
DIPLOMARBEIT

Herr
Gernot Otto Koppeter

**Lebenszykluskosten von
Brandmeldeanlagen in Eisen-
bahntunnel am Beispiel des
Koralmtunnels**

Mittweida, 2016

DIPLOMARBEIT

Lebenszykluskosten von Brandmeldeanlagen in Eisen- bahntunnel am Beispiel des Koralmtunnels

Autor:

Gernot Otto Koppeter

Studiengang:

Wirtschaftsingenieurwesen

Seminargruppe:

KW10sGA-F

Erstprüfer:

Prof. Dr. Andreas Hollidt

Zweitprüfer:

Prof. Dr. Johannes N. Stelling

Einreichung:

Mittweida, 25.04.2016

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2016

DIPLOMA THESIS

Life-cycle costs of fire detection systems in railway tunnels, especially in the Koralm tunnel

author:

Mr.

Gernot Otto Koppeter

course of studies:

Economics for Engineers

seminar group:

KW10sGA-F

first examiner:

Prof. Dr. Andreas Hollidt

second examiner:

Prof. Dr. Johannes N. Stelling

submission:

Mittweida, 25.04.2016

defence/ evaluation:

Mittweida, 2016

Bibliografische Beschreibung:

Koppeter, Gernot:

Lebenszykluskosten von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel am Beispiel des Koralmtunnels. 2016. - 6, 66, 15 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Diplomarbeit, 2016

Referat:

Die Diplomarbeit befasst sich mit Lebenszykluskosten von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel am Beispiel des Koralmtunnels mit näherer Betrachtung der Instandhaltung.

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 <i>Lebenszyklusbetrachtung.....</i>	<i>2</i>
2.1.1 Produktlebenszyklus	3
2.1.2 Lebenszyklus technischer Systeme.....	5
2.1.3 Wirtschaftliche Lebenszyklusbetrachtung.....	5
2.1.4 Lebenszykluskosten	8
2.1.5 Lebenszykluskostenrechnung	9
2.2 <i>Instandhaltung.....</i>	<i>13</i>
2.2.1 Begriffsdefinition.....	13
2.2.2 Instandhaltungsziele.....	17
2.2.3 Instandhaltungsstrategien	18
2.2.4 Instandhaltungskosten	22
2.2.5 Instandhaltungsmanagement	25
2.2.6 Instandhaltungsprozess.....	26
2.2.7 Einflussfaktoren der Instandhaltung.....	27
2.3 <i>Brandmeldeanlagen</i>	<i>30</i>
2.3.1 Branddetektion mit Punktmeldern.....	32
2.3.2 Branddetektion mit Rauchansaugsystemen.....	32
2.4 <i>Eisenbahntunnel in Österreich.....</i>	<i>32</i>
3 Instandhaltung von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel am Beispiel des Koralmtunnels	34
3.1 <i>Zielsetzung.....</i>	<i>34</i>
3.2 <i>Einflussfaktoren.....</i>	<i>36</i>

3.2.1	Umweltbezogene Einflussfaktoren	37
3.2.2	Unternehmensbezogene Faktoren	38
3.2.3	Anlagenbezogene Faktoren	38
3.2.4	Systembezogene Faktoren	39
4	Lebenszykluskostenbetrachtung für Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel am Beispiel des Koralmtunnels.....	41
4.1	<i>Erfassung und Bewertung der relevanten Kosten</i>	<i>41</i>
4.1.1	Planung- und Errichtungsphase	41
4.1.2	Betriebsphase	44
4.1.3	Neuerrichtung	47
4.2	<i>Anwendung am Beispiel des Koralmtunnel</i>	<i>50</i>
5	Schlussbetrachtung.....	59
5.1	<i>Ergebnisse und Maßnahmen</i>	<i>59</i>
5.2	<i>Konsequenzen.....</i>	<i>60</i>
Literatur	61
Anhang	67
Selbstständigkeitserklärung	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassischer Produktlebenszyklus.....	4
Abbildung 2: Verhältnis von Anschaffungs- und Folgekosten	6
Abbildung 3: Grundformel Kapitalwert.....	10
Abbildung 4: Angepasste Formel Kapitalwert	11
Abbildung 5: Grundformel Endwert.....	11
Abbildung 6: Unterteilung der Instandhaltung in Grundmaßnahmen.....	14
Abbildung 7: Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen.....	17
Abbildung 8: Vorteile von Instandhaltungsstrategien	20
Abbildung 9: Nachteile von Instandhaltungsstrategien	21
Abbildung 10: Klassifizierung der Instandhaltungskosten	24
Abbildung 11: Input- und Outputfaktoren der Instandhaltung.....	28
Abbildung 12: Systemkomponenten von Brandmeldeanlagen.....	31
Abbildung 13: Darstellung der Lebenszykluskosten.....	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Errichtungskosten Variante 1, Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern.....	42
Tabelle 2: Errichtungskosten Variante 2, Brandmeldeanlagen mit Raumansaugsystemen	42
Tabelle 3: Jährliche Instandhaltungskosten Variante 1, Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern.....	45
Tabelle 4: Jährliche Instandhaltungskosten Variante 2, Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen.....	45
Tabelle 5: Neuerrichtungskosten nach 20 Jahren für Variante 1	48
Tabelle 6: Neuerrichtungskosten nach 20 Jahren für Variante 2	48
Tabelle 7: Kapitalwertberechnung Variante 1 (mit $i = 3\%$).....	51
Tabelle 8: Kapitalwertberechnung Variante 2 (mit $i = 3\%$).....	52
Tabelle 9: Kapitalwertberechnung Variante 1 (mit $i = 11,25\%$)	54
Tabelle 10: Kapitalwertberechnung Variante 2 (mit $i = 11,25\%$)	55
Tabelle 11: Endwertberechnung Variante 1 (mit $i = 3\%$)	56
Tabelle 12: Endwertberechnung Variante 2 (mit $i = 3\%$)	57

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
BMF	Bundesministerium für Finanzen
BMZ	Brandmelderzentrale
BTE	Bund Technischer Experten
DIN	Deutsches Institut für Normung
IGS	Industrielle Gefahrenmeldesysteme
EN	Europäische Norm
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
LCC	Life Cycle Costing
LWL	Lichtwellenleiter
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
ÖNORM	Österreichische Norm
pa.	Pauschale
PVC	Polyvinylchlorid
RAS	Rauchansaugsystem
Stk.	Stück
TCO	Total Cost of Ownership
TS	Tunnelsituation
ÜBZERT	Überwachungs- und Zertifizierungsstelle
URL	Uniform Resource Locator
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie

1 Einleitung

Der von der ÖBB-Infrastruktur AG geplante Koralmtunnel ist mit einer Länge von ca. 33 km der längste Eisenbahntunnel der in Bau befindlichen Koralmbahn zwischen Graz und Klagenfurt und soll voraussichtlich im Jahr 2023 in Betrieb gehen. Aufgrund von gesetzlichen Vorgaben zur Sicherheit in Eisenbahntunnel im europäischen Eisenbahnsystem sind sämtliche technischen Räume von Sicherheitseinrichtungen des Tunnels mit Brandmeldern zu überwachen. Aus technischer Sicht gibt es nun mehrere Varianten von Brandmeldeanlagen zur Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben. Ziel dieser Arbeit ist es, für den Koralmtunnel die kostengünstigste Variante von Brandmeldeanlagen über den gesamten Lebenszyklus zu ermitteln. Dies erfolgt unter Berücksichtigung zwei verschiedener Varianten von Brandmeldeanlagen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in einen theoretischen Grundlagenteil, welcher unter Berücksichtigung der aktuellen Literatur den derzeitigen Wissens- und Forschungsstand zum Thema widerspielt, sowie einen praktischen Arbeitsteil, in dem das Thema aus wirtschaftlicher Sicht durchleuchtet und anhand einer Lebenszykluskostenrechnung die beste Variante von Brandmeldeanlagen im Koralmtunnel ermittelt wird. Der Fokus soll neben der Planungs- und Errichtungsphase bzw. der Neuerrichtung vor allem im Betrieb der Anlage liegen. Dabei soll im Speziellen die Instandhaltung berücksichtigt werden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel erfolgt unter Berücksichtigung der aktuellen Fachliteratur eine Einführung in die Lebenszyklusbetrachtung. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Erarbeitung des Themas der Lebenszykluskostenrechnung gelegt, da diese von großer Bedeutung für den praktischen Teil dieser Arbeit ist. Zudem wird das Thema Instandhaltung ausführlich dargelegt, da es als wesentlicher Pfeiler für die im Praxisteil folgende Lebenszykluskostenrechnung dient. Darüber hinaus werden die zwei gewählten Varianten von Brandmeldeanlagen in ihrer Funktionsweise dargelegt. Abschließend folgt eine kurze Darstellung der Eisenbahntunnel in Österreich.

2.1 Lebenszyklusbetrachtung

Der Begriff Lebenszyklus in seiner Anwendung auf nicht natürliche Systeme greift das für natürliche Organismen geltende Charakteristikum des Lebens auf und schematisiert die Entwicklungsphasen bzw. -stadien, die ein Objekt während seiner Lebensdauer durchläuft, in einem zeitbezogenen und/oder logischen Beschreibungsmodell.¹

Die Betrachtung von Lebenszyklen und Lebensphasen von technischen bzw. sozio-technischen Systemen kann ähnlich zu Systemen mit beschränkter Lebenszeit in der Biologie oder Natur erfolgen. Dabei durchlebt das System während der Lebenszeit die Phasen des *sWerdens%*, des *sBestehens%* und des *sVergehens%*, wobei sich *lebenswichtige%* Systemzustandsgrößen innerhalb der Lebensphasen ändern. Im Allgemeinen können drei Arten von Betrachtungsweisen für Lebenszyklen und Lebensphasen dargestellt werden.²

Die *Lebensphasenkonzepte* erläutern die Lebensphasen von Produkten anhand von Material, Energie- und Emissionsflüssen. Diese sogenannten Produktlebensphasen richten sich nach den chronologischen und konsequenten Abfolgen innerhalb eines Produktwer-

¹ Zehbold (1996), S. 2.

² Vgl. Herrmann (2010), S. 63 f.; vgl. Zehbold (1996), S. 2.

degangs (z. B. Entwicklung, Produktion) und können je nach Konzeption linear oder kreislauforientiert betrachtet werden.³

Innerhalb der *Lebenszykluskonzepte* werden die chronologischen Veränderungen wesentlicher Systemzustandsgrößen dargelegt. Dabei können aufgrund des Verlaufs der Zustandsgrößenveränderungen meist Zyklen identifiziert und verschiedene Phasen dargestellt werden (z. B. Einführungsphase, Wachstumsphase).⁴

Bei den *integrierten Lebenszykluskonzepten* werden sowohl die verschiedenen Lebensphasen (z. B. Investitionsphase, Nutzungsphase) als auch die Veränderungen der wesentlichen Systemzustandsgrößen (z. B. Kosten) innerhalb dieser Phasen betrachtet.⁵

In weiterer Folge sollen die zwei letztgenannten Lebenszykluskonzepte näher untersucht werden, da diese aufgrund der Zustands- bzw. Phasenorientierung für die weitere Betrachtung relevant sind. Zur Veranschaulichung dieser Lebenszykluskonzepte soll in den nächsten Abschnitten der Produktlebenszyklus der Betriebswirtschaftslehre sowie der Lebenszyklus technischer Systeme näher erläutert werden.

2.1.1 Produktlebenszyklus

Bei der klassischen Betrachtung des Produktlebenszyklus wird die Entwicklung von Umsatz bzw. Absatz von Produkten in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Dabei können die Phasen Einführung, Wachstum, Reife, Sättigung und Rückgang charakterisiert werden. Am Beginn erfolgt die Einführung des neuen Produktes am Markt, wobei sich der Absatz aufgrund von Faktoren wie geringer Bekanntheit und unausgereifter Technik noch in Grenzen hält. Die Wachstumsphase ist charakterisiert durch steigenden Absatz infolge erhöhter Akzeptanz für das Produkt am Markt. Begründet durch das Marktwachstum treten neue Unternehmen in den Markt ein. In der Reifephase verlangsamt sich das Wachstum allmählich und kommt in der Sättigungsphase langsam zum Erliegen. Die Akzeptanz des Produktes nimmt ab und die Absatzmengen sinken. Am Ende des klassischen Pro-

³ Vgl. Herrmann (2010), S. 63 f.; vgl. Zehbold (1996), S. 2.

⁴ Vgl. Herrmann (2010), S. 63 f.

⁵ Vgl. ebda.

duktlebenszyklus erfolgt in der Rückgangsphase das Ausscheiden des Produkts vom Markt.⁶

Die nachfolgende Abbildung zeigt den typischen Verlauf des klassischen Produktlebenszyklus anhand einer Kurve.

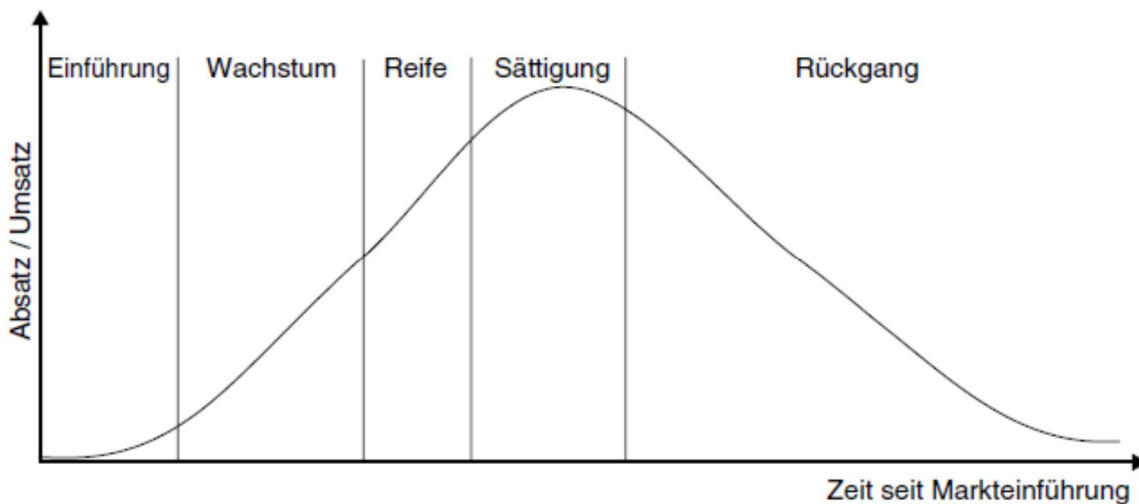


Abbildung 1: Klassischer Produktlebenszyklus⁷

Die Betrachtungsweise des klassischen Produktlebenszyklus beschränkt sich auf den Zyklus von der Markteinführung bis zum Ausscheiden eines Produktes aus dem Markt. Im Sinne der integrierten Lebenszykluskonzepte kann der klassische Produktlebenszyklus um eine Entstehungs- und eine Entsorgungsphase erweitert werden. Die dem Marktzyklus vorgelagerte Entstehungsphase beinhaltet die Forschung und Entwicklung neuer Produkte. In der Entsorgungsphase werden Maßnahmen der Garantieabwicklung, der Entsorgung bzw. Verwertung sowie dem allfälligen Rückbau von Produktionsanlagen berücksichtigt.⁸

In weiterer Folge soll die Lebenszyklusbetrachtung am Beispiel von technischen Systemen näher veranschaulicht werden.

⁶ Vgl. Herrmann (2010), S. 70 f.; vgl. Betz (2010), S. 913 f.

⁷ Darstellung übernommen aus Herrmann (2010), S. 70.

⁸ Vgl. Herrmann (2010), S. 71.; vgl. Becher (2013), S. 58 f.

2.1.2 Lebenszyklus technischer Systeme

Unter dem Begriff eines technischen Systems kann beispielhaft ein Bauteil, eine Baugruppe, ein einzelnes Produkt oder auch eine Technologie verstanden werden. Ein technisches System unterliegt einem Lebenszyklus mit den Phasen des Werdens, Bestehens und Vergehens. Im Laufe der Zeit erfahren wesentliche Systemzustandsgrößen Änderungen aufgrund von Umwelteinflüssen und Nutzungsgrad, welche bei zu großen Abweichungen von Idealwerten zum Ausfall des Systems führen können. Der Zeitraum von der Entstehung bis zum Ausfall des Systems kann als technische Nutzungsdauer bezeichnet werden. Da dieser Zeitraum vorwiegend nicht exakt bestimmt werden kann, wird die mittlere technische Nutzungsdauer herangezogen, welche als einen durch die Ausfallsrate bestimmten Erwartungswert dargestellt werden kann. Der Ausfallzeitpunkt von technischen Systemen kann durch angemessene Maßnahmen, wie z. B. Instandhaltung, hinausgezögert werden. Die dabei entstehende verlängerte Lebensdauer wird oft als wirtschaftliche Nutzungsdauer beschrieben.⁹

Im nächsten Schritt soll die wirtschaftliche Betrachtung von technischen Systemen über deren Lebensdauer näher erläutert werden.

2.1.3 Wirtschaftliche Lebenszyklusbetrachtung

Im Zuge der Lebenszyklusbetrachtung aus wirtschaftlicher Sicht werden sämtliche auftretenden Kosten während der Lebensdauer von technischen Systemen, wie z. B. technischen Anlagen oder technischen Produkten, analysiert. Diese sogenannten Lebenszykluskosten können dabei nach den jeweiligen Lebenszyklusphasen in Vorlauf-, Herstell-, Folge- und Nachlaufkosten gegliedert werden.¹⁰ Besonders bei technischen Systemen mit höheren Folge- und Nachlaufkosten ist im Vergleich zu den Vorlauf- und Herstellkosten die wirtschaftliche Lebenszyklusbetrachtung von großem Stellenwert. Bei der Beschaffung von technischen Anlagen gehen zum Beispiel Schätzungen von fünf bis zehn Mal höheren Folge- und Nachlaufkosten gegenüber den Vorlauf- und Herstellkosten aus.¹¹ Die

⁹ Vgl. Herrmann (2010), S. 69 f.

¹⁰ Vgl. ebda., S. 121.

¹¹ Vgl. Geißdörfer (2008), S. 1.

nachstehende Abbildung soll dieses Verhältnis am Beispiel eines Eisbergs besser veranschaulichen.



Abbildung 2: Verhältnis von Anschaffungs- und Folgekosten¹²

Aus Nutzersicht kann daher eine umfassende und gezielte Kostenanalyse über die gesamte Lebensdauer einer technischen Anlage im Zuge einer Neubeschaffung dazu beitragen, die vorteilhafteste Entscheidung mit den geringsten Lebenszykluskosten zu treffen. Demgegenüber besteht aus Herstellersicht die Möglichkeit der Produktoptimierung durch eine wirtschaftliche Lebenszyklusbetrachtung in den Anfangsphasen eines Produkts mit Hilfe der frühzeitigen Kenntnis über die Entwicklung und Zusammenhänge der auftretenden Kosten in den unterschiedlichen Lebenszyklusphasen.¹³

Die wirtschaftliche Lebenszyklusbetrachtung basiert gewissermaßen auf den Konzepten der Lebenszyklusrechnung, welche unter praktisch gleichbedeutenden Begriffen, wie Le-

¹² Darstellung übernommen aus Geißdörfer (2008), S. 2.

¹³ Vgl. Herrmann (2010), S. 131.

benszyklusrechnung, Lebenszykluskostenrechnung, Product Life Cycle Costing, Life Cycle Cost Analysis oder auch *Life Cycle Costing* in der Fachliteratur vorzufinden sind.¹⁴ Die Anfänge dieser Konzepte reichen bis in die frühen 1930er Jahre zurück, als der Oberste Rechnungshof der Vereinigten Staaten von Amerika die Folgekosten von Betrieb und Wartung bei der Beschaffung von Traktoren einbezog. Die Weiterentwicklung dieses Konzeptes wurde unter dem Begriff *Life Cycle Costing (LCC)* zum Beginn der 1960er Jahre in den Vereinigten Staaten von Amerika bei Beschaffungsentscheidungen des Verteidigungsministeriums eingesetzt und fand dort in den 1970er Jahren Anwendung bei der Abwicklung von Infrastrukturbauvorhaben.¹⁵ Die Definition von Life Cycle Costing umfasst den Ablauf zur Untersuchung und Planung von Lebenszykluskosten.¹⁶ Die Zielsetzung des Life Cycle Costing besteht in der Optimierung sämtlicher auftretender Kosten und Erlöse über alle Lebensphasen eines technischen Systems sowie der damit zusammenhängenden Maßnahmen und Abläufe.¹⁷

In den frühen LCC-Konzepten wurde ausschließlich eine Kostenbetrachtung während des Lebenszyklus eines technischen Systems durchgeführt. Diese Betrachtungsweise kann auch als *Lebenszykluskostenrechnung im engeren Sinne* bezeichnet werden. Diese Ansichtswiese ist jedoch weniger geeignet, wenn den Kosten auch Erlöse gegenübergestellt werden können. Daher werden in neueren LCC-Konzepten, welche unter *Lebenszykluskostenrechnung im weiteren Sinne* zusammengefasst werden können, auch Erlöse beachtet.¹⁸

Bevor nun die Lebenszykluskostenrechnung an sich näher betrachtet wird, soll im nächsten Schritt der Begriff der Lebenszykluskosten ausführlicher erläutert werden.

¹⁴ Vgl. Herrmann (2010), S. 132; vgl. Zehbold (1996), S. 1 f.

¹⁵ Vgl. Geißdörfer (2008), S. 55.

¹⁶ Vgl. Herrmann (2010), S. 132.

¹⁷ Vgl. VDI 2884 (2005), S. 4.

¹⁸ Vgl. Herrmann (2010), S. 132; vgl. Zehbold (1996), S. 3.

2.1.4 Lebenszykluskosten

Kosten werden nach Schmalenbach definiert als *„der wertmäßige Verzehr von Produktionsfaktoren zur Leistungserstellung und Leistungsverwertung sowie zur Sicherung der dafür notwendigen betrieblichen Kapazitäten“*¹⁹

Dieser Definition steht der Ansatz eines pagatorischen Kostenbegriffs gegenüber, welcher sich in erster Linie durch seine Fixierung auf die tatsächlichen Ausgaben hervorhebt. Im Sinne des pagatorischen Kostenbegriffs werden nur jene Ausgaben berücksichtigt, die tatsächlich einen Aufwand darstellen. In Theorie und Praxis hat sich jedoch der wertmäßige Kostenbegriff durchgesetzt.²⁰

Der Begriff Lebenszykluskosten umfasst insbesondere alle Kosten, welche im Laufe des Lebenszyklus einer Anlage, eines Produkts oder eines technischen Systems im Zuge von Initiierung, Planung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung anfallen. Die Lebenszykluskosten können dabei nach den Merkmalen Phasenorientierung, Relevanz, Personenbezug, Häufigkeit und Kausalität betrachtet werden.²¹

Das Merkmal der Phasenorientierung beschreibt, in welchem Ausmaß die Kosten strukturiert werden. Dabei kann die Kostenbetrachtung einzelne Phasen bzw. zusammengefasste oder aufgelöste Teilphasen umfassen.²²

Bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten sind jene Kosten relevant, welche durch konkrete Entscheidungen beeinflusst werden und von diesen somit abhängig sind. Bei der Auswahl von Alternativen sind daher die relevanten Kosten zu beachten.²³

Unter Personenbezug wird die Kostenbetrachtung entweder aus der Sicht des Herstellers oder der des Nutzers verstanden. Aus Nutzersicht sind beispielsweise die Kosten für Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung einzuordnen. Der Hersteller betrachtet hingegen vornehmlich die Kosten für Planung, Errichtung und Vertrieb.²⁴

¹⁹ Schmalenbach (1960), S. 6.

²⁰ Vgl. Stelling (2009), S. 15 f.

²¹ Vgl. Herrmann (2010), S. 133 f.

²² Vgl. ebda.

²³ Vgl. ebda.

²⁴ Vgl. ebda.

In Hinblick auf die Kostenhäufigkeit werden einmalige und wiederkehrende Kosten unterschieden, wobei die wiederkehrenden Kosten in regelmäßigen oder unregelmäßigen Zeiträumen auftreten können. Als Beispiele für wiederkehrenden Kosten können Instandhaltungskosten oder Energiekosten genannt werden. Einmalige Kosten stellen beispielsweise Kosten für die Planung oder Errichtung dar.²⁵

Bei der Einteilung der Kosten nach der Kausalität kann in Anfangs- und Folgekosten unterschieden werden. Die Anfangs- und Folgekosten stehen dabei zueinander in einer besonderen Wechselwirkung. Besonders in frühen Phasen ist der Grad der Beeinflussbarkeit in Hinblick auf die entstehenden Kosten noch sehr hoch. Eine weitere Betrachtungsweise differenziert zwischen Vorlaufkosten, laufende Kosten und Nachsorgekosten.²⁶

2.1.5 Lebenszykluskostenrechnung

Die Lebenszykluskostenrechnung im engeren Sinn stellt grundsätzlich unter Anwendung diverser Methoden und Instrumente des Rechnungswesens den Verlauf der anfallenden Kosten während des gesamten Lebenszyklus eines technischen Systems dar. Eine Zielsetzung besteht in der Identifizierung von relevanten Kostentreibern in den verschiedenen Lebenszyklusphasen sowie der Darlegung von wechselseitigen Abhängigkeiten von aufgetretenen Kosten in unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus. Folglich können zum Beispiel durch Anhebung der Entwicklungskosten instandhaltungsärmere Konstruktionen eingesetzt werden, welche zu einer Reduktion der Instandhaltungskosten führen. Diese Austauschbeziehungen werden auch als *Trade-off* bezeichnet.²⁷

In weiterer Folge soll die Lebenszykluskostenrechnung im Kontext mit den Teilgebieten des internen Rechnungswesens, insbesondere der Investitionsrechnung, näher behandelt werden.²⁸ Die Investitionsrechnung ist gegenüber der Kosten- und Leistungsrechnung langfristig ausgerichtet und soll einem Unternehmen die erforderlichen Informationen zur Einschätzung von Investitionsentscheidungen für die strategische Planung der Unterneh-

²⁵ Vgl. Herrmann (2010), S. 133 f.

²⁶ Vgl. ebda.

²⁷ Vgl. Herrmann (2010), S. 135.; Becher (2013) S. 58.

²⁸ Vgl. Herrmann (2010), S. 135.

mensprozesse liefern. Unter den Berechnungsmethoden in der Investitionsrechnung erfolgt eine Einordnung in statische und dynamische Verfahren. In weiterer Folge wird das dynamische Verfahren der Kapitalwertmethode, welche häufig für die Lebenszykluskostenberechnung eingesetzt wird, ausführlicher behandelt.²⁹

Bei der Kapitalwertmethode wird der Kapitalwert für die Investitionsentscheidung herangezogen. Der Kapitalwert umfasst sämtliche Ein- und Auszahlungen einer Investition, welche auf einen bestimmten Zeitpunkt auf- bzw. abgezinst werden. Die Kapitalwertmethode setzt die Annahme eines vollkommenen Kapitalmarktes voraus, auf dem zu einem einheitlichen Kalkulationszinssatz unbeschränkt viel Kapital entlehnt oder veranlagt werden kann. Auf Basis des Kalkulationszinssatzes werden die Zahlungen einer Investitionsalternative auf- bzw. abgezinst.³⁰

Liegt der Bezugszeitpunkt am Anfang des betrachteten Zeitraums eines Investitionsgegenstandes ($t = 0$), entspricht der Kapitalwert der Summe sämtlicher bezogen auf den Zeitpunkt $t = 0$ abgezinsten Zahlungen, welche durch den Investitionsgegenstand hervorgerufen werden. Demzufolge stellt der Kapitalwert einen Barwert des Investitionsgegenstandes dar. Der Investitionsgegenstand erweist sich als absolut vorteilhaft, sofern der ermittelte Kapitalwert größer als Null ist. Bei der Auswahl aus mehreren Alternativen ist die Investitionsalternative mit dem größten Kapitalwert als relativ vorteilhaft zu bezeichnen. Bei Annahme eines unveränderlichen Kalkulationszinssatzes über sämtliche betrachteten Zeitabschnitte kann der Kapitalwert gemäß nachstehender Formel berechnet werden.³¹

$$KW = \sum_{t=0}^T \frac{e_t - a_t}{(1+i)^t}$$

KW = Kapitalwert
 t = Zeitpunkt, T = letzter betrachteter Zeitpunkt
 e_t = Einzahlungen zum Zeitpunkt t
 a_t = Auszahlungen zum Zeitpunkt t
 i = Kalkulationszinssatz

Abbildung 3: Grundformel Kapitalwert³²

²⁹ Vgl. Herrmann (2010), S. 138 f.; vgl. Nemeti et al. (2014), S. 43.

³⁰ Vgl. Götze (2008), S. 71 f.

³¹ Vgl. ebda.

³² Darstellung übernommen aus Ott (2011), S. 90.

Die Differenz aus Ein- und Auszahlungen zum jeweilig betrachteten Zeitpunkt t entspricht der sogenannten Nettzahlung. Je nach Höhe der Ein- bzw. Auszahlungen kann ein Überschuss oder ein Verlust resultieren. Die Nettzahlungen nach dem Zeitpunkt $t = 0$ werden demnach auf eben diesen Zeitpunkt $t = 0$ abgezinst. Für eine detaillierte Betrachtung von bestimmten Nettzahlungen, wie Anschaffungsauszahlung zum Zeitpunkt $t = 0$ bzw. Liquidationserlös zum Zeitpunkt $t = T$, kann der Kapitalwert mit der nachstehenden angepassten Formel berechnet werden.³³

$$KW = -a_0 + \sum_{t=1}^T \frac{(e_t - a_t)}{(1+i)^t} + \frac{L}{(1+i)^T}$$

KW = Kapitalwert

t = Zeitpunkt, T = letzter betrachteter Zeitpunkt

e_t = Einzahlungen zum Zeitpunkt t

a_t = Auszahlungen zum Zeitpunkt t

a_0 = Anschaffungsauszahlung

i = Kalkulationszinssatz

L = Liquidationserlös

Abbildung 4: Angepasste Formel Kapitalwert³⁴

Im Gegensatz zum Barwert ist der Endwert das Gesamtergebnis unterschiedlicher Zahlungsströme, Ein- oder Auszahlungen sowie Einzahlungsüberschüsse, wobei sich die jeweils aufgezinsten Zeitwerte summieren.³⁵

$$K_t = ZW_t \cdot (1+i)^t = Z_t \cdot q^t$$

K_t = Endwert

ZW_t = Zeitwert

i = Zinssatz

t = Periode

Abbildung 5: Grundformel Endwert³⁶

³³ Vgl. Götze (2008), S. 72.

³⁴ Darstellung übernommen aus Ott (2011), S. 90.

³⁵ Vgl. Ott (2011), S. 86.

³⁶ Darstellung übernommen aus Ott (2011), S. 86.

Bei den dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung spielt die Höhe des Kalkulationszinssatzes eine wesentliche Rolle.³⁷ Eine falsche Annahme des Kalkulationszinssatzes kann zu unzuverlässigen Ergebnissen und folglich zu falschen Investitionsentscheidungen führen.³⁸ Grundsätzlich stellt der Kalkulationszinssatz die minimal geforderte Verzinsung des in der Investition gebundenen Kapitals dar. Die Auswahl des Kalkulationszinssatzes richtet sich an den jeweiligen Marktzinsen. In Abhängigkeit der Finanzierungsform ist der Zinssatz für Eigenkapital oder Fremdkapital bzw. ein gewichteter Mischzinssatz bei Finanzierung mit Eigen- und Fremdkapital zu beachten. Des Weiteren können auch Risikoaufschläge sowie prognostizierte Inflationsraten berücksichtigt werden.³⁹

Gemäß dem Preinreich-Lücke-Theorem entspricht das Ergebnis einer Kapitalwertberechnung basierend auf Ein- und Auszahlungen, dem einer Berechnung auf Grundlage von Erlösen und Kosten, sofern die folgenden Bedingungen erfüllt werden. Zum einen muss über den gesamten Betrachtungszeitraum die Differenz aus Einzahlungen und Auszahlungen der Differenz aus Erlösen und Kosten entsprechen. Demzufolge dürfen nur Grundkosten im Zuge der Berechnung berücksichtigt werden. Außerdem muss der Periodengewinn um die kalkulatorischen Zinsen der Kapitalbindung des Investitionsgegenstandes der vorangehenden Periode verringert werden, damit die Unterschiede von Periodisierung bzw. zeitlichem Anfall von Zahlungen und Erfolgsgrößen berücksichtigt werden.⁴⁰

Um die Berechnungen möglichst einfach und übersichtlich zu gestalten, werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Grundkosten berücksichtigt und keine kalkulatorischen Kosten, wie kalkulatorische Abschreibung und kalkulatorische Zinsen.

³⁷ Vgl. Ott (2011), S. 83.

³⁸ Vgl. Heesen (2012), S. 25.

³⁹ Vgl. Ott (2011), S. 83 f.; vgl. Heesen (2012), S. 25.

⁴⁰ Vgl. Hermann (2010), S. 142 f.

2.2 Instandhaltung

Die grundlegende Aufgabe der Instandhaltung ist die Aufrechterhaltung der Anlagenverfügbarkeit und Anlagenkapazität in Hinblick auf die Anlagennutzungsdauer, um so einen Beitrag zur Erreichung der Unternehmensziele zu leisten.⁴¹ Im folgenden Abschnitt soll zunächst der Begriff der Instandhaltung erläutert werden.

2.2.1 Begriffsdefinition

Der Begriff Instandhaltung ist in der Norm DIN EN 31051 als die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann⁴² definiert. Demzufolge werden unter Instandhaltung alle Maßnahmen zur Erhaltung und Wiederherstellung des optimalen Anlagenzustandes verstanden. Darüber hinaus wird die technische Verbesserung einer Anlage als Aufgabe der Instandhaltung betrachtet.⁴³ Im Zuge der Instandhaltung sind sowohl innerbetriebliche als auch außerbetriebliche Anforderungen und angemessene Instandhaltungsstrategien zu beachten sowie die Unternehmensziele mit den Instandhaltungszielen zu koordinieren. Die Norm DIN EN 31051 trifft eine Unterteilung der Instandhaltung in die grundsätzlichen Maßnahmen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. Die folgende Abbildung stellt diese Unterteilung dar, wobei die jeweiligen Instandhaltungsmaßnahmen in weiterer Folge ausführlich dargestellt werden.⁴⁴

⁴¹ Vgl. Schröder (2010), S. 29.

⁴² DIN EN 31051 (2012), S. 3.

⁴³ Vgl. Gassner (2013), S. 120.

⁴⁴ Vgl. DIN EN 31051 (2012), S. 4.

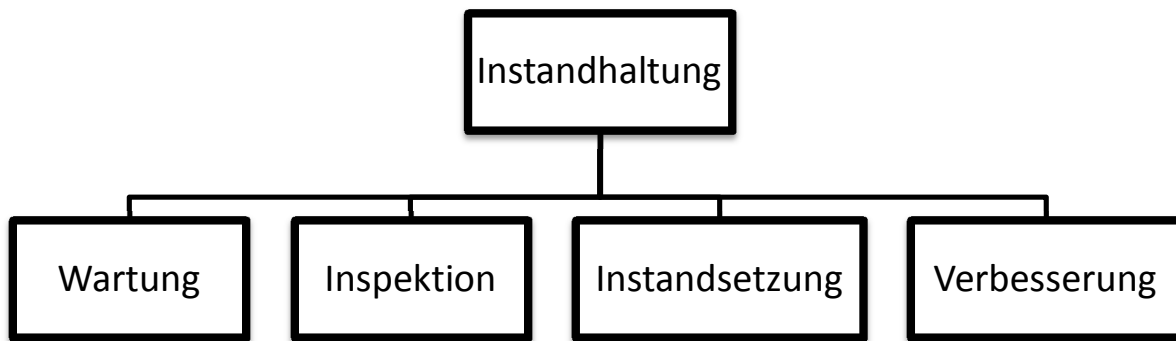


Abbildung 6: Unterteilung der Instandhaltung in Grundmaßnahmen⁴⁵

Im Zuge der *Wartung* werden alle Schritte zur Erhaltung des Sollzustandes von technischen Betriebsmitteln einer Anlage zusammengefasst. Die Tätigkeiten der Wartung reduzieren somit die Abnutzung von Anlagen und verlängern die Nutzungsdauer. Zudem haben Wartungsmaßnahmen präventiven Charakter und verhindern dadurch Ausfälle aufgrund von Defekten.⁴⁶ Die Wartung wird auch als Maßnahme zur Verzögerung eines Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrates definiert.⁴⁷ Wobei der Abnutzungsvorrat die Menge einer erreichbaren Funktionsdurchführung unter bestimmten Maßgaben darstellt und durch Maßnahmen der Herstellung, Instandsetzung oder Verbesserung verändert wird.⁴⁸

Im Rahmen der *Inspektion* wird der Istzustand einer Anlage erfasst und zugleich bewertet. Ergänzend erfolgen eine Ursachenbestimmung einer allfällig festgestellten Abnutzung sowie die Ableitung von erforderlichen Konsequenzen zur zukünftigen Anlagennutzung.⁴⁹ Die Inspektion liefert folglich aktuelle Zustandsinformationen der Anlage bzw. von Anlagenteilen und hilft dadurch, Verschlechterungen des Anlagenzustands frühzeitig zu er-

⁴⁵ Darstellung in Anlehnung an DIN EN 31051 (2012), S. 4.

⁴⁶ Vgl. Schröder (2010), S. 30.

⁴⁷ DIN EN 31051 (2012), S. 5.

⁴⁸ Vgl. DIN EN 31051 (2012), S. 8.

⁴⁹ Vgl. ebda. (2012), S. 5.

kennen und damit Schäden zu vermeiden. Auf Basis der erfassten Informationen im Zuge der Inspektion können weitere Instandhaltungsmaßnahmen geplant und eingeleitet sowie die Beseitigung störungsanfälliger Konstruktionen veranlasst werden. Außerdem kann die Wirksamkeit von durchgeführten Wartungsmaßnahmen überprüft werden. Da bei der Ausübung der Inspektion der dafür erforderliche Aufwand und in technischer Hinsicht Beschränkungen zu beachten sind, ist nicht jede technisch erdenkliche Maßnahme zur Inspektion auch wirtschaftlich zweckmäßig. Darüber hinaus müssen gesetzliche Bestimmungen seitens Arbeitnehmer- und Umweltschutz sowie Vorgaben von Versicherungsunternehmen bei der Planung und Durchführung von Inspektionsmaßnahmen stets berücksichtigt werden.⁵⁰

Unter *Instandsetzung* werden alle physischen Maßnahmen zur Wiederherstellung einer fehlerhaften Anlage verstanden.⁵¹ Demzufolge ist der Sollzustand einer Anlage wieder herbeizuführen, wobei als Maßstab nicht vergangenheitsorientierte Werte, sondern vielmehr an neue Voraussetzungen angepasste Werte des Sollzustandes gelten sollen. In Bezug auf das Ausmaß der Planung und Vorbereitung kann zwischen geplanter, vorbereiteter und unvorhergesehener Instandsetzung differenziert werden. Bei geplanter Instandsetzung sind Zeitpunkt sowie Art und Umfang der erforderlichen Maßnahmen vorab bekannt. Sofern Art und Umfang der Instandsetzungsmaßnahmen bereits beurteilt werden können, jedoch der Zeitpunkt der Realisierung noch unbekannt ist, wird von vorbereiteter Instandsetzung gesprochen. Im Falle der unvorhergesehenen Instandsetzung sind Art und Umfang sowie der Zeitpunkt der Instandsetzungsmaßnahmen vorweg unbekannt. Die vorbereitete und unvorhergesehene Instandsetzung können nach dem Realisierungszeitpunkt der Instandsetzungsmaßnahmen als bestimmendes Planungskriterium auch unter dem Begriff der ungeplanten Instandsetzung zusammengefasst werden.⁵² Die geplante bzw. ungeplante Instandsetzung kann auch als vorbeugende bzw. schadensbedingte Instandsetzung bezeichnet werden.⁵³

⁵⁰ Vgl. Schröder (2010), S. 31.

⁵¹ Vgl. DIN EN 31051 (2012), S. 6.

⁵² Vgl. Alcalde Rasch (2000), S. 19 f.

⁵³ Vgl. Schröder (2010), S. 32.

Im Zuge der *Verbesserung* erfolgen administrative und technische Maßnahmen, aber auch Managementmaßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit einer Anlage, wobei die ursprüngliche Funktion der Anlage dabei nicht verändert wird. Zusätzlich können Verbesserungsmaßnahmen auch zur Abwendung von Fehlern im laufenden Betrieb sowie zur Vermeidung von Ausfällen durchgeführt werden.⁵⁴ Die Aufgaben der Verbesserung können dabei Maßnahmen zur Erweiterung und Modernisierung von Anlagen zur Senkung der Lebenszykluskosten sowie der Steigerung der Leistungsfähigkeit von Anlagen, wie z. B. Verringerung der Durchlaufzeiten oder Ausbau der Kapazitäten umfassen.⁵⁵

Die nachstehende Abbildung stellt abschließend die Instandhaltungsmaßnahmen der Wartung, Inspektion und Instandsetzung mit den jeweiligen Auswirkungen auf den Ausnutzungsgrad einer Anlage dar. Durch die Wartung wird der Abbau des Abnutzungsvorrates verlangsamt und somit die mögliche Anlagennutzungsdauer verlängert. Der aktuelle Abnutzungsgrad wird infolge der Inspektion festgestellt, um bei Erreichen einer festgelegten Grenze Instandsetzungsmaßnahmen einzuleiten. Im Zuge der Instandsetzung erfolgt die Wiederherstellung des Sollzustandes.⁵⁶

⁵⁴ Vgl. DIN EN 31051 (2012), S. 6.

⁵⁵ Vgl. Schröder (2010), S. 32.

⁵⁶ Vgl. Herrmann (2010), S. 355.

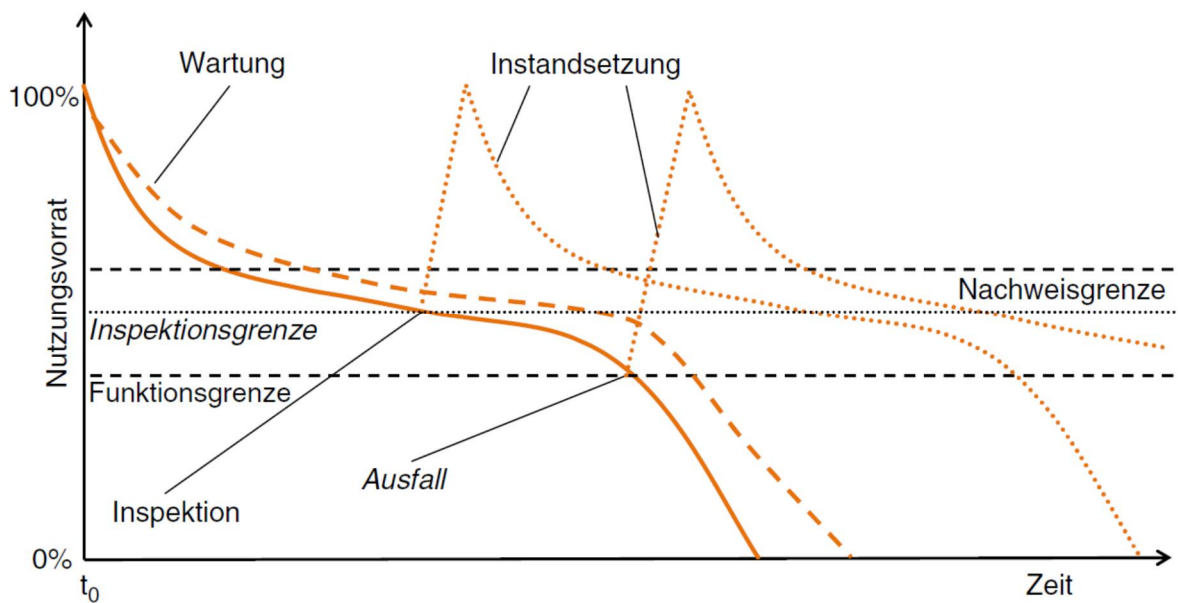


Abbildung 7: Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen⁵⁷

Je nach Anwendung und Kombination der erläuterten Instandhaltungsmaßnahmen führen diese zu unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien, welche zur Erreichung von verschiedenen unternehmensabhängigen Zielsetzungen der Instandhaltung erforderlich sind. Ein Überblick dieser Instandhaltungsziele soll im nächsten Abschnitt dargestellt werden.

2.2.2 Instandhaltungsziele

Die Hauptziele der Instandhaltung leiten sich von den Unternehmenszielen ab und umfassen die Gewinnmaximierung bzw. Kostenminimierung sowie die Maximierung der Anlagenzuverlässigkeit und Sicherheit. Die von diesen Hauptzielen abgeleiteten Unterziele gliedern sich in technisch-organisatorische, wirtschaftliche, sozial- und umweltorientierte Ziele. Zu den technisch-organisatorischen Zielen zählen unter anderem die Reduktion von Anlagenausfällen und des Instandhaltungsumfangs, die Vereinheitlichung der Aufbau- und Ablauforganisation sowie die Verbesserung der Kommunikation mit anderen Unternehmensbereichen. Die wirtschaftlichen Ziele umfassen die Senkung von Personal-, Ma-

⁵⁷ Darstellung übernommen aus Herrmann (2010), S. 355.

terial- und Ausfall- bzw. Ausfallfolgekosten und des Weiteren die Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit. Unter den sozial- und umweltorientierten Zielen stehen u. a. die Steigerung der Arbeitssicherheit sowie die Senkung von Emissionen, Umweltkosten und Ressourcenbedarf im Vordergrund.⁵⁸ Um diese Instandhaltungsziele zu erreichen, sind geeignete Instandhaltungsstrategien erforderlich. Diese werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

2.2.3 Instandhaltungsstrategien

Instandhaltungsstrategien sind Bestimmungen und allgemeine Herangehensweisen zur anlagenbezogenen Festlegung der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen hinsichtlich Methodik, Umfang, Art und Zeitabfolge.⁵⁹ Im Allgemeinen werden Instandhaltungsstrategien kategorisiert in vorbeugende und ausfallbedingte Strategien. Im Zuge der *ausfallbedingten Strategien* treten Instandhaltungsmaßnahmen erst zum Zeitpunkt des Auftretens von Fehlern oder Ausfällen einer Anlage ein. Die erforderlichen Maßnahmen werden daher nicht geplant und erfolgen im Bedarfsfall. Diese Strategien sind auch bekannt unter Korrektiv-, Feuerwehr- oder Ausfallstrategien. Bei den *vorbeugenden Strategien* hingegen erfolgt eine Planung des Zeitpunkts einer Instandhaltungsmaßnahme, um einen Fehler oder Ausfall einer Anlage vorzeitig abzuwenden. Der Unterschied dieser Einordnung liegt im Informationsbedarf. Während bei vorbeugenden Strategien Informationen über Abnutzungsentwicklungen und Ausfallzeitpunkte von Anlagen unerlässlich sind, besteht bei ausfallbedingten Strategien keine Notwendigkeit dieser Informationen. Ein häufiger Grund für die Wahl von ausfallbedingten Strategien liegt gezwungenermaßen an fehlenden Angaben, die für eine vorbeugende Instandhaltung erforderlich sind. Es besteht aber auch die Möglichkeit, trotz allfällig vorhandener Informationen bewusst Ausfälle bzw. Fehler in Kauf zu nehmen, da die resultierenden Auswirkungen in ökonomischer, technischer oder sicherheitsrelevanter Hinsicht unwesentlich sind. Demzufolge gilt es bei der Auswahl einer dieser Strategien abzuwägen zwischen der Höhe der finanziellen Auswirkungen von Ausfällen bzw. Fehlern einer ausfallbedingten Strategie und den entstehenden Ausgaben der Planung und Informationsermittlung im Zuge einer vorbeugenden

⁵⁸ Vgl. Matyas (2013), S. 25f.; Schröder (2010), S. 107.

⁵⁹ Vgl. Schröder (2010), S. 107 f.

Strategie.⁶⁰ Innerhalb der vorbeugenden Instandhaltungsstrategien besteht darüber hinaus noch eine Unterteilung nach Art und Weise der Informationsbeschaffung in Präventivstrategien und Inspektionsstrategien. Bei der *Präventivstrategie* erfolgt die Planung und Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen auf Basis von Wahrscheinlichkeiten und Erfahrungswerten über mögliche Ausfälle oder Fehler von Anlagen bzw. Anlagenteilen ohne den tatsächlichen Istzustand zu berücksichtigen. Andererseits werden bei der *Inspektionsstrategie* die Instandhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit des aktuellen Anlagenzustands geplant und durchgeführt. Dafür sind Informationen über den grundlegenden Abnutzungsverlauf von Anlagen und Anlagenteilen erforderlich. Außerdem wird der Istzustand im Zuge von Inspektionstätigkeiten permanent erfasst und zur Überarbeitung der Abnutzungsentwicklung sowie Planung und Durchführung zukünftiger Maßnahmen herangezogen. Dabei wird die Möglichkeit zur Messung des Abnutzungsvorrates vorausgesetzt.⁶¹

Die Auswahl der optimalen Instandhaltungsstrategie ist abhängig von den grundlegenden Zielsetzungen des Unternehmens sowie Faktoren wie Anlageneigenschaften (z. B. Ausfall- und Fehlerverhalten, Instandhaltbarkeit), Ausfall- bzw. Ausfallfolgekosten, Gesetzesvorgaben und Ausgaben für Informationsbeschaffung und Planung. So wird die ausfallbedingte Strategie für unkritische Anlagen ohne große Ausfall- bzw. Fehlerauswirkung sowie bei Anlagen mit fehlenden oder nur mit großem Aufwand zu ermittelnden erforderlichen Informationen (z. B. Abnutzungsverhalten) für eine allfällige vorbeugende Strategie vorgeschlagen. Demgegenüber wird die Anwendung der Inspektionsstrategie vornehmlich bei sicherheitsrelevanten Anlagen mit erheblichen Auswirkungen bei Ausfällen oder Fehlern vorgeschlagen. Bei Anlagen mit generell wiederkehrenden, umfassenden und vorgeschriebenen Wartungstätigkeiten wird die Präventivstrategie als zweckmäßig erachtet. Wobei bei diesen Anlagen meist Gesetze oder andere Richtlinien die Vorgaben für die Instandhaltung liefern.⁶² Eine Übersicht der soeben behandelten Instandhaltungsstrategien mit den jeweils möglichen Vor- und Nachteilen ist in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt.

⁶⁰ Vgl. Wilhelm (2011), S. 67 ff.

⁶¹ Vgl. ebda.

⁶² Vgl. ebda.

	Ausfallbedingte Strategien	Vorbeugende Strategien	
	Korrektivstrategien	Präventivstrategien	Inspektionsstrategien
Fokus	Instandsetzung	Wartung	Inspektion
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Optimale Ausnutzung der technischen Lebensdauer • keine laufenden Kosten • keine zusätzlichen Aufwände/Auswirkungen durch Instandhaltungsmaßnahmen • geringer Planungsaufwand • scheinbare Kostenminimierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Planung und Abstimmung der Maßnahmen möglich • Konkrete Kriterien für Outsourcing-Entscheidungen • Senkung der Ausfallkosten • Garantierte Anlagenverfügbarkeit möglich • Dauerhafter Erhalt der Funktion (z.B. hinsichtlich Effizienz, Sicherheit) • Reduzierung von ungeplanten Ausfällen mit entsprechenden Konsequenzen • Instandhaltungskosten einfacher zu kalkulieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Genauigkeitsgrad bzgl. Abnutzungsverhalten erforderlich • Optimale Ausnutzung der technischen Lebensdauer möglich • Gute Planbarkeit der Maßnahmen • Hohes Maß an Anlagenverfügbarkeit erreichbar • Dauerhafter Erhalt der Funktion • Reduzierung von ungeplanten Ausfällen mit entsprechenden Konsequenzen • Instandhaltungskosten einfacher zu kalkulieren

Abbildung 8: Vorteile von Instandhaltungsstrategien⁶³

⁶³ Darstellung in Anlehnung an Wilhelm (2011), S. 70.; Herrmann (2010), S. 363.

	Ausfallbedingte Strategien	Vorbeugende Strategien	
	Korrektivstrategien	Präventivstrategien	Inspektionsstrategien
Fokus	Instandsetzung	Wartung	Inspektion
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Risiko ökonomischer, ökologischer oder sozialer Folgen bei Ausfällen • Funktionalität evtl. eingeschränkt (z. B. Sicherheit, Effizienz) • Kosten sind schwieriger kalkulierbar • Hoher zeitlicher Druck bei Schadensbehebung mit negativer Beeinträchtigung der Ausführungsqualität • Mögliche Engpässe und höhere Preise bei der Ersatzteilbeschaffung • Ungleichmäßige Auslastung von Instandhaltungskapazitäten • Eingeschränkte Outsourcing-Möglichkeiten • Keine hohe garantierte Anlagenverfügbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Planungsaufwand (Daten-generierung und Datenpflege) • Uneinheitliche Aussagen über Verschleißverhalten von Anlagen bzw. Anlagenteilen • Technische Lebensdauer wird nicht optimal ausgenutzt • Höhere Anzahl an Maßnahmen erhöht Fehlerwahrscheinlichkeit • Evtl. insgesamt mehr Ersatzteile notwendig (z.B. durch zu frühen Austausch) • Ökonomische, ökologische und soziale Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen • Laufende Kosten durch Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. Material, Personal) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliche Kostennachteile durch zusätzliche Anzahl an Inspektionen und erforderliche Qualifikation des Personals • Ökonomische, ökologische und soziale Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen • Laufende Kosten durch Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. Material, Personal)

Abbildung 9: Nachteile von Instandhaltungsstrategien⁶⁴

Abgesehen von den bereits geschilderten Instandhaltungsstrategien sind zusätzlich noch technische und personelle Strategien zu erwähnen. Im Zuge der *technischen Strategien* werden bereits bei der Planung und Beschaffung von Anlagen geeignete Maßnahmen zur Reduktion oder gar Vermeidung des Instandhaltungsbedarfs an sich getroffen. Dies wird durch eine instandhaltungsgerechte Konstruktion wie standardisierten, leicht zugänglichen und austauschbaren Anlagenteilen sowie einer Verminderung von Gefahrenquellen ange-

⁶⁴ Darstellung in Anlehnung an Wilhelm (2011), S. 70.; Herrmann (2010), S. 363.

strebt. Ein weiterer Aspekt dieser Strategien ist der Einsatz von technischen Diagnoseverfahren zur Zustandserfassung im laufenden Betrieb der Anlagen. Demzufolge können Zustandsveränderungen rechtzeitig erkannt und damit Anlagenausfälle verhindert werden. Allfällig erforderliche Abschaltungen von Anlagen für Inspektionstätigkeiten können dadurch ebenfalls reduziert werden. Bei den *personellen Strategien* soll eine ständige Aus- und Weiterbildung die Qualifikation der Mitarbeiter steigern und somit die Instandhaltung in Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Sicherheit positiv beeinflussen. Aufgrund der hohen Qualifikation der Mitarbeiter können mögliche Fehlerquellen eher erkannt, die erforderliche Arbeitszeit verkürzt und die Sicherheit verbessert werden. Des Weiteren wird ein instandhaltungsgerechter Arbeitseinsatz durch Bündelung von Spezialwissen auf bestimmte Mitarbeiter sowie eine effektive Planung und Vorbereitung der Instandhaltungstätigkeiten erreicht.⁶⁵

Da die Zielsetzung der Kostenminimierung, neben dem Ziel der Maximierung von Anlagenzuverlässigkeit und Sicherheit, einen wesentlichen Erfolgsfaktor für eine optimale Instandhaltungsstrategie darstellt, soll im nächsten Abschnitt die Wirkung der Instandhaltung auf die Kosten ergründet werden.

2.2.4 Instandhaltungskosten

Die Instandhaltungskosten sind als Mischkosten oder auch als semivariable Kosten zu betrachten, da sie sich aus Fixkosten und variablen Kosten zusammensetzen. Die Instandhaltung besitzt durch die Höhe der Instandhaltungskosten einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten eines Unternehmens. Im Allgemeinen können Instandhaltungskosten charakterisiert werden als Kosten, welche durch Tätigkeiten zur Vermeidung und Abwendung der Abnutzung von Anlagen sowie den daraus erwachsenen ökonomischen Folgen entstehen. Dabei werden prinzipiell Kosten von schadensvorbeugenden Instandhaltungsmaßnahmen wie Wartung und Inspektion sowie Kosten von schadensbehebenden Instandhaltungsmaßnahmen wie Instandsetzung gesondert betrachtet. Diese Einteilung wird vorrangig aufgrund des Merkmals getroffen, ob eine Abnahme der Funktionsfähigkeit mitsamt finanziellem Verlust entstanden ist oder nicht. Ebenso sind

⁶⁵ Vgl. Bauer (2008), S. 37 ff.

Anlagenausfallkosten, die sich auf den wirtschaftlichen Schaden eines teilweisen oder kompletten Ausfalls einer Anlage beziehen, bei der Betrachtung der Instandhaltungskosten zu berücksichtigen. Dabei werden Anlagenausfallkosten als Ergebnis von ungenügend ausgeführten Instandhaltungstätigkeiten verstanden. Zu den Anlagenausfallkosten zählen unter anderem die Stillstandskosten sowie die durch den Anlagenausfall fehlenden Deckungsbeiträge. Die Stillstandskosten beinhalten alle in der Zeit des Stillstands der Anlage angefallenen Kosten wie Personal- und Materialkosten für die Außer- und Wiederinbetriebnahme, Kosten für Überstunden zur Einarbeitung von Produktionsverlusten sowie Kosten für gegebenenfalls erforderliche Fremdvergaben. Die durch Anlagenausfall fehlenden Deckungsbeiträge gelten hinsichtlich des entscheidungsorientierten Kostenbegriffs als Opportunitätskosten, welche z. B. durch uneinholbare Produktionsverluste oder Erlöseinbußen aufgrund fehlerhafter Produkte entstehen. Im übergeordneten Sinn klassifizieren sich die Instandhaltungskosten in *indirekte Instandhaltungskosten* . bestehend aus den Anlagenausfallkosten, die durch mangelhafte oder unzureichende Instandhaltungsmaßnahmen hervorgerufen werden . und *direkte Instandhaltungskosten*, welche die Kosten der eigentlichen Instandhaltungsmaßnahmen wie Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung umfassen.⁶⁶

Neben den bereits dargelegten Einflussfaktoren der Instandhaltung auf Kosten eines Unternehmens hat auch die Lebensdauer mit den daraus resultierenden Lebenszykluskosten eine große Bedeutung. Die Lebenszykluskosten umfassen alle Kosten, die im Zuge des gesamten Lebenszyklus einer Anlage anfallen. Der Lebenszyklus reicht von der Planung, Entwicklung, Produktion, Beschaffung, Montage und Nutzung bis zur Demontage und Entsorgung einer Anlage.⁶⁷ Schon in der Phase der Planung einer Anlage können bereits wesentliche Schritte zur Beeinflussung der Lebenszykluskosten getroffen werden. In der Phase der Anlagenutzung kann durch geeignete und im Speziellen verbessernde Maßnahmen die Anlagenabnutzung vermindert und somit die Anlagenlebensdauer verlängert werden. Infolgedessen können direkte Instandhaltungs- und Anlagenausfallkosten reduziert und der Kapitalwert der Anlage aufgrund der längeren Verfügbarkeit der Anlage im Leistungserstellungsprozess verbessert werden. Dadurch können geplante Reinvestitionen hinausgezögert oder sogar übergangen werden. Der geeignete Zeitpunkt für einen

⁶⁶ Vgl. Schröder (2010), S. 37 f.

⁶⁷ Vgl. Herrmann (2010), S. 133 f.

Technologiesprung einschließlich der damit verbundenen positiven Effekte, wie geringere spezifische Produktionskosten, sollte bei den länger verfügbaren Anlagen jedoch nicht außer Acht gelassen werden.⁶⁸ In der nachstehenden Abbildung erfolgt abschließend eine Zusammenfassung der durch die Instandhaltung beeinflussbaren Kosten.

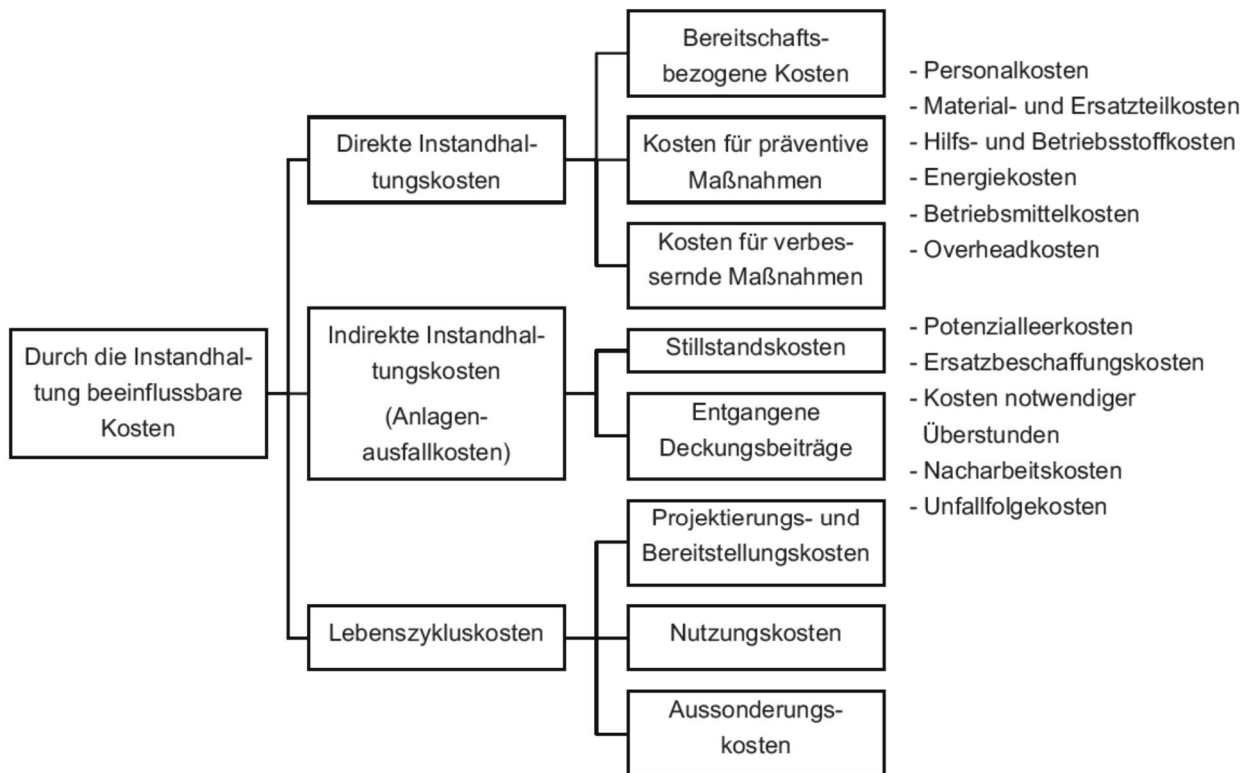


Abbildung 10: Klassifizierung der Instandhaltungskosten⁶⁹

Bevor nun Ansätze zur Optimierung in der Instandhaltung erarbeitet werden können, sind die Begriffe Instandhaltungsmanagement und Instandhaltungsprozess in den nächsten zwei Abschnitten noch allgemein zu charakterisieren.

⁶⁸ Vgl. Schröder (2010), S. 39; Alcalde Rasch (2000), S. 54 f.

⁶⁹ Darstellung übernommen aus Schröder (2010), S. 38.

2.2.5 Instandhaltungsmanagement

Im Zuge der Instandhaltung ist gemäß Definition im Abschnitt 2.1.1 grundsätzlich nur die wirksame Durchführung von Maßnahmen hinsichtlich des betriebsbereiten Anlagenzustands ausschlaggebend. Das Instandhaltungsmanagement ergänzt diese Auffassung um technische und wirtschaftliche Betrachtungsweisen. Dabei orientiert sich das Instandhaltungsmanagement auf die effiziente und effektive Bewerkstelligung von Instandhaltungsmaßnahmen in den Bereichen Planung, Durchführung, Kontrolle und Verbesserung.⁷⁰ Diese Auslegung findet sich auch in ÖNORM EN 13306 wieder, wo Instandhaltungsmanagement alle Managementmaßnahmen umfasst, welche mittels Instandhaltungszielen und -strategien sowie Verantwortlichkeiten und Durchführung der Instandhaltung bestimmt sind und durch Schritte der Planung, Steuerung und Verbesserung unter Berücksichtigung ihrer Wirtschaftlichkeit umgesetzt werden.⁷¹

Ferner können die Managementmaßnahmen nach dem kybernetischen Kreis Planung-Ausführung-Kontrolle und unter zusätzlicher Betrachtung der Personalführung in nachstehende Aufgabengebiete eingeteilt werden:⁷²

- Formulierung der Instandhaltungsziele mit anlagenwirtschaftlichem Bezug⁷³
- Bildung einer anpassungsfähigen Instandhaltungsstrategie⁷⁴
- Planung von Instandhaltungstätigkeiten mittels unternehmensspezifischen Instrumenten⁷⁵

⁷⁰ Vgl. Schröder (2010), S. 97.

⁷¹ Vgl. ÖNORM EN 13306 (2010), S. 5.

⁷² Vgl. Schröder (2010), S. 97.

⁷³ Vgl. Schröder (2010), S. 98.

⁷⁴ Vgl. ebda.

⁷⁵ Vgl. ebda.

- Disposition von Instandhaltungspersonal, Ersatzteilen und sonstigen erforderlichen Mitteln⁷⁶
- Planung und Steuerung von Ablauf und Terminen der Instandhaltungstätigkeiten⁷⁷
- Überwachung von Anlagenzuständen und Maßnahmenausführung⁷⁸
- Instandhaltungscontrolling als Vermittler zwischen operativer und strategischer Ebene⁷⁹
- Verwendung von zielführenden Techniken und Instrumenten zur Problemlösung sowie organisatorischen Hilfsmitteln zur Durchführung der geschilderten Untersuchungs-, Planungs- und Überwachungsmaßnahmen⁸⁰

Demzufolge ist das Instandhaltungsmanagement angehalten, auf Basis einer prozessorientierten Betrachtung . unter Berücksichtigung der Unternehmens- und Instandhaltungsziele . einen geeigneten Instandhaltungsprozess zu definieren.⁸¹ Der nächste Abschnitt soll daher eine allgemeine Übersicht über den Instandhaltungsprozess darlegen.

2.2.6 Instandhaltungsprozess

Der Instandhaltungsprozess kann im engeren Sinne in die Betriebsprozesse der Instandhaltung wie Wartung, Inspektion und Instandsetzung sowie in unterstützende Serviceprozesse wie Aus- und Weiterbildung, Fehlerursachenanalyse und Verbesserung unterteilt werden. Ferner werden die Prozesse der Ersatzteillogistik bestehend aus Materialdisposi-

⁷⁶ Vgl. Schröder (2010), S. 98.

⁷⁷ Vgl. ebda.

⁷⁸ Vgl. ebda.

⁷⁹ Vgl. ebda.

⁸⁰ Vgl. ebda.

⁸¹ Vgl. ebda.

tion, -verwaltung und -entsorgung den Instandhaltungsprozessen im engeren Sinne zugeordnet. Andererseits können zu den Instandhaltungsprozessen im weiteren Sinne die Prozesse des Managements wie Planung, Überwachung und Kontrolle sowie Prozesse für Sicherheit und Qualität wie z. B. Arbeitnehmer- und Umweltschutz sowie Zertifizierung zugeordnet werden.⁸² Die Instandhaltungsmaßnahmen der maßgeblichen Betriebsprozesse wurden bereits im Abschnitt 2.1.1 behandelt. Eine wichtige Bedeutung für den gesamten Instandhaltungsprozess kann schließlich noch dem Prozess der Ersatzteillogistik zugeschrieben werden. Hier gilt es, zwischen den positiven Effekten einer hohen Verfügbarkeit an Ersatzteilen und den negativen Effekten von hohen Ersatzteilbeständen im Lager abzuwägen. Durch die hohe Ersatzteilverfügbarkeit können die Ausfallzeiten von Anlagen reduziert und somit die indirekten Instandhaltungskosten gesenkt werden. Begründet aus einem nicht klar definierten Ersatzteilbedarf kann eine hohe Verfügbarkeit einen hohen Lagerbestand von Ersatzteilen ergeben. Oft handelt es sich dabei um besonders individuelle und wenig verwendete Ersatzteile. Ein hoher Lagerbestand an Ersatzteilen kann beträchtliche Kosten bewirken und sollte nicht vernachlässigt werden.⁸³ Im folgenden Abschnitt sollen die verschiedenen Einflussfaktoren auf den Instandhaltungsprozess dargelegt werden, um daraus Ansätze zur Effizienzsteigerung in der Instandhaltung abzuleiten.

2.2.7 Einflussfaktoren der Instandhaltung

Die Effizienz ist ein Gradmesser für die Wirtschaftlichkeit und wird als Verhältnis zwischen den eingesetzten Ressourcen und der erzielten Leistung definiert. Beim Minimumprinzip liegt Effizienz vor, wenn mit minimalem Einsatz von Ressourcen die festgelegte Leistung erzielt wird. Hingegen ist beim Maximumprinzip das Erreichen der maximalen Leistungsausbeute bei bestehendem Ressourceneinsatz als effizient zu bezeichnen. Vereinfacht kann die Effizienz als ressourcenorientierte Wirksamkeit⁸⁴ verstanden werden. Demgegenüber wird unter Effektivität das Verhältnis zwischen definiertem Ziel und resultierender

⁸² Vgl. Männel (2004), S. 150 f.

⁸³ Vgl. Gassner (2013), S. 118.

Wirkung verstanden. Zusammengefasst kann die Effektivität als zielorientierte Wirksamkeit dargestellt werden.⁸⁴

Bezogen auf den Instandhaltungsprozess sind für eine optimale Instandhaltung Inputfaktoren der ressourcenorientierten Wirksamkeit und Outputfaktoren der zielorientierten Wirksamkeit zu berücksichtigen.⁸⁵ Eine Darstellung dieser Faktoren erfolgt in der nachstehenden Abbildung.

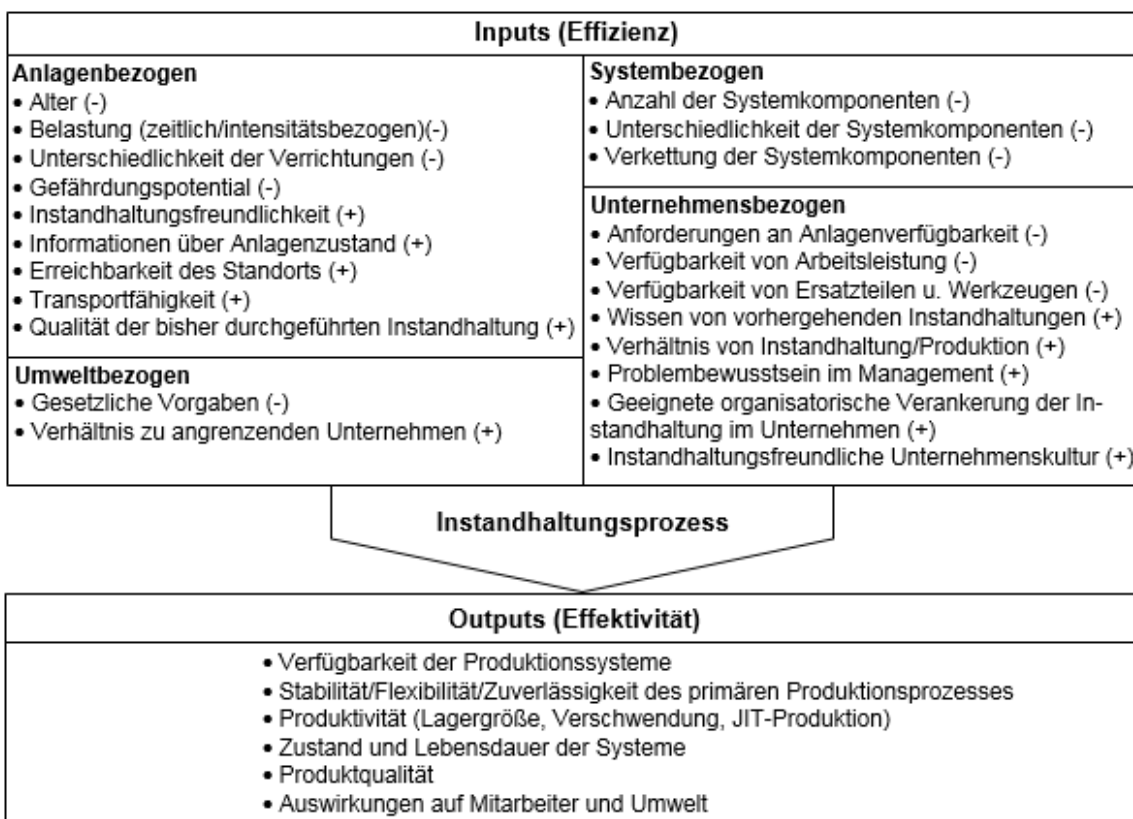


Abbildung 11: Input- und Outputfaktoren der Instandhaltung⁸⁶

⁸⁴ Vgl. Schröder (2010), S. 134 f.; Stelling (2009) S. 246.

⁸⁵ Vgl. Gassner (2013), S. 122; Schröder (2010), S. 135 f.

⁸⁶ Darstellung übernommen aus Gassner (2013), S. 122.

Eine optimale Durchführung der Instandhaltung wird somit erreicht, wenn durch einen minimalen Instandhaltungsinput ein maximaler Instandhaltungsausput erzielt wird. Die Resultate bzw. Outputs des Instandhaltungsprozesses sind unter anderem eine hohe Anlagenzuverlässigkeit und -verfügbarkeit, minimale direkte und indirekte Instandhaltungskosten, eine längere Anlagenlebensdauer sowie ein erhöhter Arbeitnehmer- und Umweltschutz.⁸⁷

Die inputseitigen Einflussfaktoren des Instandhaltungsprozesses können nach den Gesichtspunkten Anlagen, System, Unternehmen und Umwelt unterteilt werden. Diese Inputs bestimmen hauptsächlich die bereitzustellenden Kapazitäten der Instandhaltung sowie Höhe und Häufigkeit der auftretenden indirekten und direkten Instandhaltungskosten.⁸⁸

Die *anlagenbezogenen* Inputfaktoren besitzen einen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen sowie das Ausmaß der direkten Instandhaltungskosten. Positive Auswirkungen auf die Steigerung der Anlagenverfügbarkeit und der Senkung der Instandhaltungskosten besitzen dabei ein gut erreichbarer Anlagenstandort, eine hoher Informationsgrad über den Zustand der Anlagen, eine gute Instandhaltbarkeit der Anlagen, ein geringes Anlagenalter, ein geringer Funktionsumfang, ein geringes Gefahrenrisiko sowie bislang mit hoher Qualität ausgeführte Instandhaltungstätigkeiten.⁸⁹

Bei den *systembezogenen* Inputgrößen haben Faktoren wie eine große Menge an verschiedenartigen Anlagentypen und Anlagenkomponenten sowie komplex verknüpfte Systemkomponenten einen negativen Einfluss auf die Instandhaltungskosten. Zum einen müssen Ersatzteile für mehrere Anlagentypen vorgehalten werden und zum anderen kön-

⁸⁷ Vgl. Gassner (2013), S. 122 f.

⁸⁸ Vgl. ebda.

⁸⁹ Vgl. ebda.

nen Gesamtsysteme einer Produktion bei einem Fehler von nur einer untergeordneten Komponente durch fehlende Redundanzen gänzlich ausfallen.⁹⁰

Unter den *unternehmensbezogenen* inputseitigen Einflussgrößen ergeben sich infolge hoher Forderungen an die Anlagenverfügbarkeit steigende direkte Instandhaltungskosten, verursacht durch hohe Personalkapazitäten und Ersatzteilbestände. Durch gezielte Planung der Instandhaltungstätigkeiten und der Verfügbarkeit der Erkenntnisse aus früheren Instandhaltungshandlungen können die Instandhaltungskosten wiederum minimiert werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, mit entsprechender Festigung des Instandhaltungsbereichs in der Organisation sowie Schaffung einer zweckmäßigen Unternehmenskultur die indirekten Instandhaltungskosten zu senken und allfällige Verzögerungen von Instandhaltungstätigkeiten zu minimieren.⁹¹

Im Zuge der *umweltbezogenen* Einflussfaktoren sind unter anderem verbindliche Richtlinien und Gesetze hinsichtlich Arbeitnehmer- und Umweltschutz zu berücksichtigen. Dabei steigen die Instandhaltungskosten meist mit der Härte der entsprechenden Vorschriften. Darüber hinaus ist auch die Art der Zusammenarbeit mit anderen Abteilungen und Unternehmen von großer Bedeutung. Bei guten persönlichen Kontakten können Instandhaltungsmaßnahmen oft rascher, unkomplizierter und somit mit geringeren Instandhaltungskosten durchgeführt werden.⁹²

2.3 Brandmeldeanlagen

Brandmeldeanlagen dienen zur Brandfrüherkennung mit dem Ziel, Personen oder technische Einrichtungen zu schützen. Die Planung, Errichtung und der Betrieb von Brandmeldeanlagen ist in Österreich in der ÖNORM F 3070 festgelegt. Grundsätzlich bestehen Brandmeldeanlagen aus einer Brandmeldezentrale, Brandmeldern und diversen Brand-

⁹⁰ Vgl. Gassner (2013), S. 123 f.

⁹¹ Vgl. ebda.

⁹² Vgl. ebda.

fallsteuerungen. Bei den Brandmeldern werden je nach Brandkenngröße (Rauchpartikel, Gase, Temperaturerhöhung) und Detektionsverfahren unterschiedliche Typen charakterisiert.⁹³ Die folgende Abbildung zeigt die grundsätzlichen Systemkomponenten einer Brandmeldeanlage.

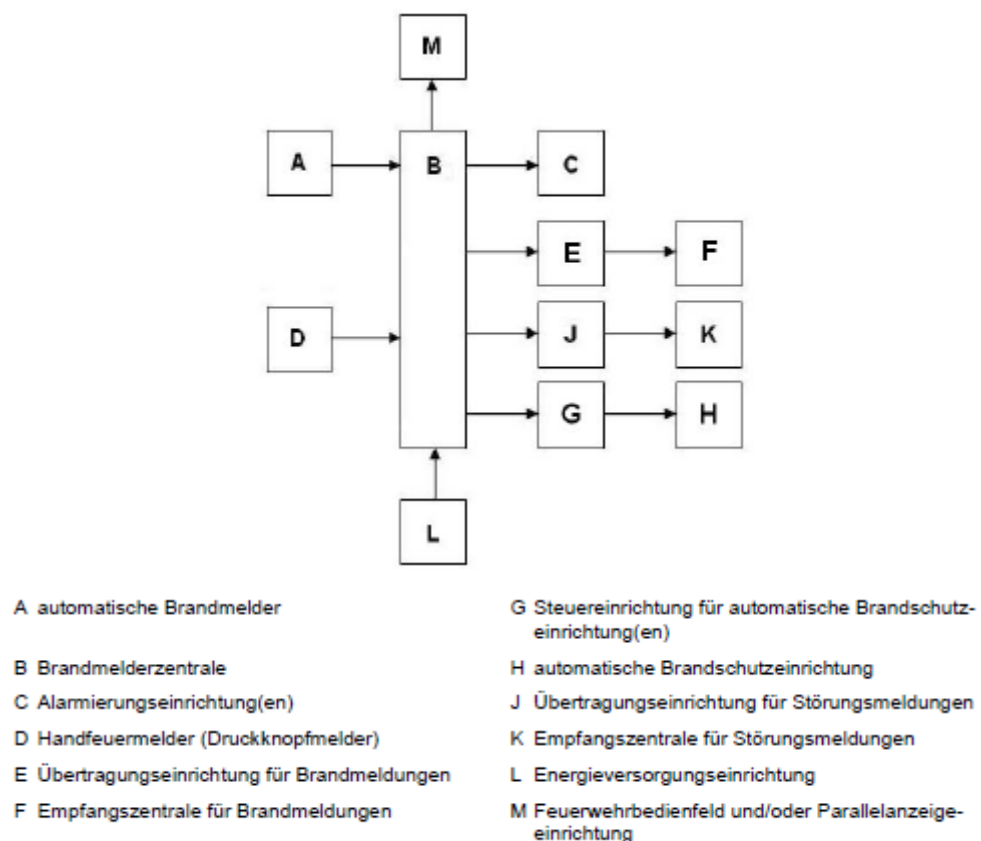


Abbildung 12: Systemkomponenten von Brandmeldeanlagen⁹⁴

In weiterer Folge sollen punktförmige Brandmelder und Rauchansaugsysteme näher erläutert werden.

⁹³ Vgl. Siemens (2013), S. 52 ff.

⁹⁴ Darstellung übernommen aus ÖNORM F3070 (2010), S. 10.

2.3.1 Branddetektion mit Punktmeldern

Brandmeldeanlagen mit punktförmigen Brandmeldern stellen den Standard dar. Die punktförmigen Brandmelder sind dabei grundsätzlich an der Decke des zu überwachten Bereiches montiert. Die Detektion eines Brandes erfolgt über die im Raum aufsteigende Temperatur- bzw. Rauchentwicklung. Die maximal zulässige Überwachungsfläche eines Brandmelders ist demzufolge auch Abhängig von der Raumhöhe. Je nach Brandmeldertyp liegt diese Fläche zwischen 30 m² und 110 m².⁹⁵

2.3.2 Branddetektion mit Rauchansaugsystemen

Bei Rauchansaugsystemen wird die Luft des überwachten Bereiches mittels Unterdruck über ein Rohrsystem angesaugt. Die angesaugte Luft wird einer Detektionseinheit zugeführt, welche die Luft auf Rauchpartikel untersucht und im Brandfall einen Alarm detektiert. Das Rohrsystem kann dabei Längen bis zu 200 m aufweisen und besteht meist aus handelsüblichen PVC-Rohren. Die Ansaugpunkte in der Rohrleitung umfassen einen Durchmesser von nur wenigen Millimetern. Aufgrund der aktiven Entnahme und Überwachung von Luftproben wird bei Rauchansaugsystemen gegenüber herkömmlichen Punktmeldern eine erheblich frühere Branddetektion erreicht. Außerdem können Rauchansaugsysteme aufgrund der besonderen Parametrierbarkeit der Detektionseinheit optimal an die Umgebungsbedingungen angepasst werden.⁹⁶

2.4 Eisenbahntunnel in Österreich

Derzeit werden in ganz Österreich ungefähr 300 Eisenbahntunnel betrieben, wobei nur ca. zehn Prozent eine Länge von mehr als einem Kilometer aufweisen. Aktuell sind hierzulande drei große Tunnelprojekte in Planung: der Koralmtunnel (33 km), der Semmeringbasistunnel (27 km) und der Brennerbasistunnel (64 km).⁹⁷

⁹⁵ Vgl. Pany (2010), S. 26.; Siemens (2013), S. 93 ff.

⁹⁶ Vgl. Pany (2010), S. 41 f.; Siemens (2013), S. 99 ff.

⁹⁷ ILF (2009), S. 2.

In Abhängigkeit vom Notfallkonzept werden Eisenbahntunnel entweder als System aus zwei eingleisigen Tunnelröhren oder als zweigleisige Tunnelröhren mit Begleitstollen ausgeführt. Im Zuge der eisenbahnrechtlichen Baugenehmigung ist die Erstellung eines Tunnelsicherheitskonzepts erforderlich, welches die für die Sicherheit relevanten Bauwerksteile und technische Ausrüstungen funktional festlegt.⁹⁸

Der Koralmtunnel wird als zweiröhriger eingleisiger Tunnel mit einer Länge von ca. 33 km auf der Strecke Graz . Klagenfurt errichtet. Die parallel geführten Tunnelröhren sind alle 500 m über Querschläge, welche als Fluchtwege dienen, verbunden. In den Querschlägen befinden sich außerdem die technischen Räume der bahntechnischen Ausrüstung. In der Mitte des Tunnels befindet sich eine Nothaltestelle, welche aufgrund der Überdeckung mit Bergmassiv von ca. 1200 m keinen direkten Zugang von außen bietet. Die Inbetriebnahme ist für das Jahr 2023 geplant.⁹⁹

⁹⁸ ILF (2009), S. 2 f.

⁹⁹ ÖBB-Infrastruktur AG - Broschüre Die Koralmbahn (2015), S. 6.

3 Instandhaltung von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel am Beispiel des Koralmtunnels

In diesem Kapitel soll anhand der bisher erarbeiteten Grundlagen die Instandhaltung von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel am Beispiel des Koralmtunnels näher dargelegt werden. Dabei werden im ersten Abschnitt die wesentlichen Ziele der Instandhaltung von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel erörtert. Im Zuge des zweiten Abschnitts sind die relevanten Einflussfaktoren auf die Instandhaltung von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel zu erarbeiten.

3.1 Zielsetzung

Bei der Instandhaltung im Allgemeinen sowie auch bei der Instandhaltung von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel sind innerbetriebliche und außerbetriebliche Anforderungen zu berücksichtigen sowie Instandhaltungsziele mit Unternehmenszielen abzustimmen.¹⁰⁰ Da der zu betrachtende Koralmtunnel als Teil der österreichischen Schieneninfrastruktur von der ÖBB-Infrastruktur AG instandgehalten wird, sind in weitere Folge die Strategien und Ziele der ÖBB-Infrastruktur AG für die weitere Betrachtung relevant.¹⁰¹

Die Strategien der ÖBB-Infrastruktur AG sind grundsätzlich fokussiert auf ihre Kunden und das Kerngeschäft der Anlagenbereitstellung und Betriebsführung auf dem ÖBB-Schienennetz mit den Leitmerkmalen Sicherheit, Pünktlichkeit und bester Kundenservice. Die Grundlage für die strategische Durchführung bilden eine Kosten- und Marktstrategie. Die Ziele der Kostenstrategie bilden Maßnahmen zur Konzentration auf das Kerngeschäft mit dem Zweck das Infrastrukturangebot dort zu bündeln, wo nachhaltig Schieneninfra-

¹⁰⁰ Vgl. DIN EN 31051 (2012), S. 4.

¹⁰¹ Vgl. ÖBB-Infrastruktur AG - Geschäftsbericht 2014, S. 2; Vgl. § 31 Abs. 1. Bundesbahngesetz (1992).

struktur angemessen ist.¹⁰² Das Kerngeschäft der ÖBB-Infrastruktur AG umfasst Planung, Bau, Instandhaltung, Bereitstellung und Betrieb einer bedarfsgerechten und sicheren Schieneninfrastruktur.¹⁰³ Mit dem Kerngeschäft nicht vereinbare Leistungen und Produkte werden mittel- bis langfristig nicht mehr offeriert.¹⁰⁴

Die Marktstrategie ist im widerspruchsfreien, allumfassenden Konzept Zielnetz 2025+ beschrieben, welches auf Unternehmensziele der ÖBB-Infrastruktur AG wie Stärkung der Marktposition, Weiterentwicklung der Sicherheit und Steigerung der Wirtschaftlichkeit ausgerichtet ist.¹⁰⁵ Um die Marktposition zu stärken sind Maßnahmen zur Erweiterung und Erneuerung des Infrastrukturangebots erforderlich. Die Bewahrung und Verbesserung der Sicherheit erfordert Maßnahmen zur Erneuerung der Bestandsanlagen und der Gewährleistung des Stands der Technik.¹⁰⁶ Dadurch sollen eine sichere, verfügbare und ohne betriebliche Behinderungen nutzbare Infrastruktur garantiert sowie die gesetzlichen Vorgaben (z. B. Tunnelsicherheit) erfüllt werden.¹⁰⁷ Die Steigerung der Wirtschaftlichkeit umfasst Maßnahmen mit der Zielsetzung die variablen und semivariablen Infrastrukturkosten (Betriebsführungs- und Instandhaltungskosten) möglichst über Markterlöse abzudecken. Die Ziele zur Stärkung der Marktposition und zur Weiterentwicklung der Sicherheit erfordern somit Investitionen zur Erneuerung bzw. Erweiterung der Infrastruktur, welche bei knappen finanziellen Mitteln das Betriebsergebnis belasten und unter diesen Umständen dem Ziel zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit entgegenwirken. Zur Abstimmung dieser drei Ziele dient die sogenannte Anforderung der Systemadäquanz als Grundsatz zur Zielnetzentwicklung in Verbindung mit den drei grundlegenden Infrastrukturplanungsbereichen Markt, Produktion und Anlagen. Das System Schiene soll dort effizient eingesetzt werden, wo die Merkmale der Nachfrage am Markt mit den Merkmalen des Systems Schiene harmonisieren. Demnach erfolgt im Zielnetz eine bedarfsgerechte Anpassung der angebotenen Anzahl der Infrastrukturanlagen. Als Ergebnis der Infrastrukturnachfrage

¹⁰² Vgl. ÖBB-Infrastruktur AG - Geschäftsbericht 2014, S. 18 f.

¹⁰³ Vgl. § 31 Abs. 1. Bundesbahngesetz (1992).

¹⁰⁴ Vgl. ÖBB-Infrastruktur AG - Geschäftsbericht 2014, S. 19.

¹⁰⁵ Vgl. ÖBB-Infrastruktur AG - Zielnetz 2025 Ergebnisbericht, S. 7 f.

¹⁰⁶ Vgl. ebda., S. 28 f.

¹⁰⁷ Vgl. ebda., S. 57.

sind geeignete Produktionsanlagen mit festgelegten Produktionseigenschaften erforderlich. Die Anzahl dieser Produktionsanlagen ist mit den Bedürfnissen der Produktion abzustimmen.¹⁰⁸ Durch diese Mengenoptimierungen an Infrastrukturanlagen bzw. Produktionsanlagen sollen Investitions- und Instandhaltungskosten reduziert werden.¹⁰⁹ Im Zuge der Systemadäquanz im Bereich Anlagen ist die Ausrichtung der Anlagenmerkmale auf die Kernfunktion des Systems Schiene hinsichtlich Dimensionierung, Komplexität und Spezifität zu gewährleisten. Auf diese Weise soll eine Verminderung der Investitions- und Instandhaltungskosten der Anlagen erreicht werden.¹¹⁰

Im Zuge der Formulierung der Instandhaltungsziele in Abstimmung mit den Unternehmenszielen ist im Allgemeinen zu berücksichtigen, dass sich die Zielsetzungen der Instandhaltung und des Unternehmens gegenseitig ergänzen und nicht entgegenwirken.¹¹¹ Demnach können aus den bereits dargelegten Unternehmenszielen der ÖBB-Infrastruktur AG die Instandhaltungsziele, welche zusammengefasst Kostenreduktion und hohe Anlagenverfügbarkeit fordern, abgeleitet werden.

Die Erreichung der formulierten Instandhaltungsziele wird von diversen Faktoren beeinflusst, welche im nächsten Abschnitt näher erläutert werden.

3.2 Einflussfaktoren

Die optimale Durchführung der Instandhaltung im Allgemeinen ist abhängig von anlagenbezogenen, systembezogenen, unternehmensbezogenen und umweltbezogenen Faktoren, wie bereits unter Punkt 2.2.7 erläutert. In weiterer Folge werden die relevanten Ein-

¹⁰⁸ Vgl. ÖBB-Infrastruktur AG . Zielnetz 2025 Ergebnisbericht, S. 28 ff.

¹⁰⁹ Vgl. ebda., S. 52.

¹¹⁰ Vgl. ebda., S. 34 f.

¹¹¹ Vgl. Schröder (2009), S. 106.

flussfaktoren für die Instandhaltung von Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel insbesondere im Koralmtunnel näher betrachtet.

3.2.1 Umweltbezogene Einflussfaktoren

Infolge gesetzlicher Auflagen und anderweitiger Bestimmungen ist die Funktionsfähigkeit von Brandmeldeanlagen permanent zu gewährleisten. Demzufolge ist eine Instandhaltung von Brandmeldeanlagen unabdingbar. Die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen für Brandmeldeanlagen in Österreich sind in der ÖNORM F3070 (Planung, Projektierung, Installation, Inbetriebnahme und Instandhaltung von Brandmeldeanlagen und Brandfallsteuerungen) festgelegt.¹¹² Dabei sind die grundlegenden Tätigkeiten für Inspektion und Wartung hinsichtlich Häufigkeit, Verantwortlichkeit und Systemkomponenten gegliedert. Die Häufigkeit der Inspektions- und Wartungstätigkeiten ist dabei in Normintervallen vorgegeben und umfasst je nach Systemkomponenten einen Zeitraum von einem Tag bis zu sechzig Monaten. Verantwortlich für die Durchführung der Inspektionstätigkeiten ist entweder der Betreiber oder der Instandhalter der Brandmeldeanlage bzw. für die Durchführung der Wartungstätigkeiten ausschließlich der Instandhalter.¹¹³ Die Inspektions- und Wartungstätigkeiten entsprechen den Anforderungen an die unterschiedlichen Systemkomponenten, welche bereits unter Punkt 2.3 erläutert wurden.

Im Gegensatz zu den Inspektions- und Wartungstätigkeiten sind die Tätigkeiten der Instandsetzung in der ÖNORM F3070 nicht sehr ausführlich festgelegt. Ein erfasster Fehler oder Ausfall von Systemkomponenten ist umgehend im Zuge von Instandsetzungstätigkeiten zu beheben. Die Dauer des Anlagenausfalls soll dabei weitestgehend minimiert werden. Außerdem wird eine vorbeugende Instandsetzung von bestimmten Systemkomponenten vorgeschrieben, sofern absehbar ist dass die erfassten Messdaten im Zuge der Wartungstätigkeit den Sollbereich bis zur nächsten Inspektion verlassen werden.¹¹⁴

¹¹² Vgl. ÖNORM F3070 (2010), S. 4.

¹¹³ Vgl. ebda., S. 26 f.

¹¹⁴ Vgl. ebda., S. 19 ff.

3.2.2 Unternehmensbezogene Faktoren

Die Instandhaltung von Brandmeldeanlagen darf gemäß gesetzlicher Bestimmungen nur von zertifizierten Fachfirmen durchgeführt werden. Im Zuge der Zertifizierung durch eine akkreditierte Zertifizierungsstelle muss die Fachfirma unter anderem diverse Nachweise, wie zum Beispiel Schulungs- und Qualifikationsnachweise der verantwortlichen Mitarbeiter, Nachweise zur Verfügbarkeit von Ersatzteilen sowie einen Nachweis einer 24-Stunden-Rufbereitschaft, vorweisen.¹¹⁵ Das entsprechende Zertifikat ist befristet auf vier Jahre und nach zwei Jahren erfolgt eine Überwachung der Fachfirma durch eine akkreditierte Zertifizierungsstelle.¹¹⁶ Aus betriebsinternen Erfahrungen kann berichtet werden, dass aufgrund dieser gesetzlichen Vorgaben und der damit verbundenen Kosten sowie Mitarbeiterressourcen die ÖBB-Infrastruktur AG die Instandhaltung für Brandmeldeanlagen nicht selbst durchführt, sondern externe Dienstleistungsunternehmen über Rahmenverträge mit dieser Aufgabe betraut.

3.2.3 Anlagenbezogene Faktoren

In dieser Arbeit wird von einer gleichen wirtschaftlichen Nutzungsdauer beider Varianten von Brandmeldeanlagen ausgegangen. Die Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen zeichnen sich gegenüber Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern erfahrungsgemäß durch einen geringeren Instandhaltungsaufwand aus, was in geringeren Instandhaltungskosten resultiert. Der Zugang zu den Anlagen beider Varianten kann bei beiden Varianten ausschließlich gleisgebunden über Schienenfahrzeuge erfolgen.¹¹⁷

¹¹⁵ Vgl. UEBZERT (2015), S. 3 ff.

¹¹⁶ Vgl. ebda., S. 7.

¹¹⁷ Eigene Darstellung auf Basis der Berufserfahrungen bei den ÖBB insbesondere beim Projekt Koralmtunnel.

3.2.4 Systembezogene Faktoren

Gemäß den gesetzlichen Vorgaben über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ sind technische Räume von Sicherheitseinrichtungen des Tunnels mit Brandmeldern zu überwachen. Technische Räume werden als abgeschlossene Räume inner- oder außerhalb von Tunnels . in diesem Fall Eisenbahntunnels . definiert, die mit Eingangs- bzw. Ausgangstüren ausgestattet sind. Diese Räume verfügen über Sicherheitseinrichtungen, die folgenden Zwecken dienen: (Selbst-) Rettung, Evakuierung, Notfallkommunikation, Brandbekämpfung und Fahrstromversorgung.¹¹⁸

Im Koralmtunnel befinden sich . aufgeteilt auf 68 Querschlüsse . insgesamt 331 Räume, welche als technische Räume im Sinne der Vorgabe „Technische Spezifikation für die Interoperabilität“ in dem Dokument „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ gelten. Diese Räume sind mit einem Doppelboden ausgestattet, welche, wie auch die technischen Räume selbst, mit Brandmeldern zu überwachen sind. Die technischen Räume außerhalb des Tunnels werden im Zuge dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da dort, aus technischen Gründen, Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern erforderlich sind.¹¹⁹

Bei der zu untersuchenden Variante 1, Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern, wird in jedem Querschlag eine Brandmeldezentrale errichtet. Diese Brandmeldezentralen sind untereinander vernetzt und mit den Brandmeldezentralen am Ost- bzw. Westportal außerhalb des Tunnels verbunden. An die Brandmeldezentrale im jeweiligen Querschlag sind die Punktmelder für die technischen Räume sowie die betreffenden Doppelböden im jeweiligen Querschlag angeschlossen. Anhand der Querschlagslängen wurden die Kabellängen der erforderlichen Brandmeldeleitungen bemessen. Demzufolge sind 68 Brandmeldezentralen und 662 Brandmelder zu errichten sowie 3.930 Meter Brandmeldekabel zu verlegen.

¹¹⁸ Vgl. Europäische Union Amtsblatt L 64/1 (2008), S. 20.

¹¹⁹ Eigene Darstellung auf Basis der Berufserfahrungen bei den ÖBB insbesondere beim Projekt Koralmtunnel.

Für Variante 2, Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen, wird in jedem Querschlag eine Rauchansaugsystemzentrale errichtet. Diese Rauchansaugsystemzentralen sind, genauso wie bei Variante 1, untereinander vernetzt und mit den Brandmeldezentralen am Ost- bzw. Westportal außerhalb des Tunnels verbunden. An die Rauchansaugsystemzentralen ist im jeweiligen Querschlag ein Rohrsystem zur Überwachung der technischen Räume und der betreffenden Doppelböden angeschlossen. Anhand der Querschlagslängen wurden die Längen für das Rohrsystem bemessen. Demzufolge sind 68 Rauchansaugsystemzentralen und 3.930 Meter Rohrsystem zu verlegen.

4 Lebenszykluskostenbetrachtung für Brandmeldeanlagen in Eisenbahntunnel am Beispiel des Koralmtunnels

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels erfolgt die Erfassung und Bewertung der für die Lebenszykluskostenrechnung relevanten Kosten für die Planungs- und Errichtungsphase, der Betriebsphase sowie bei Neuerrichtung. Anhand der erfassten Kosten erfolgt im Anschluss die Lebenszykluskostenrechnung für beide Varianten von Brandmeldeanlagen im Koralmtunnel.

4.1 Erfassung und Bewertung der relevanten Kosten

Die folgenden Kostenermittlungen werden jeweils für Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern (Variante 1) und Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen (Variante 2) am Beispiel des Koralmtunnels durchgeführt. Da zu Beginn die Planungs- und Errichtungsphase steht, wird nachstehend mit dieser begonnen.

4.1.1 Planung- und Errichtungsphase

Anhand der in Punkt 3.2.4 erfassten Anzahl der Systemkomponenten für Variante 1, Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern, und Variante 2, Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen, erfolgt in diesem Abschnitt jeweils die Ermittlung der Errichtungs- und Planungskosten. Die Preise für die Errichtungskosten wurden aus firmeninternen Rahmenverträgen entnommen und sind den nachfolgenden Tabellen 1 und 2 zu entnehmen.

Tabelle 1: Errichtungskosten Variante 1, Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern

Bezeichnung	Menge	Einheit	Preis/Menge	Preis/Position
Brandmeldezentrale (Zentrale mit 2 Ringlinien, Vernetzung)	68	Stk.	1.263,58	85.923,44
LWL-Konverter für Vernetzung BMZ	68	Stk.	2.643,56	179.762,08
Brandmelder inkl. Sockel	662	Stk.	71,25	47.167,50
Brandmeldekabel	3930	m	0,24	943,20
Montage Brandmelder	662	Stk.	19,30	12.776,60
Montage BMZ	68	Stk.	245,00	16.660,00
Verlegung Brandmeldekabel	3930	m	0,90	3.537,00
Beistellung und Montage Installationsrohr	1965	m	14,89	29.258,85
Inbetriebnahme BMZ	68	Stk.	1.500,00	102.000,00
Gesamtsumme				478.028,67

Tabelle 2: Errichtungskosten Variante 2, Brandmeldeanlagen mit Raumansaugsystemen

Bezeichnung	Menge	Einheit	Preis/Menge	Preis/Position
RAS-Zentrale (Kondensatabscheider, Kugelhahn, Netzteil)	68	Stk.	4.190,96	284.985,28
LWL-Konverter für Vernetzung RAS-Zentrale	68	Stk.	2.643,56	179.762,08
Rohrsystem (inkl. Kleber, Rohrklemmen, Muffen, Winkel, Bogen, ð)	3930	m	4,00	15.720,00
Montage RAS	68	Stk.	245,00	16.660,00
Montage Rohrsystem	3930	m	2,00	7.860,00
Inbetriebnahme RAS	68	Stk.	1.500,00	102.000,00
Gesamtsumme				606.987,36

Wie ein Vergleich der Tabellen 1 und 2 ergibt, sind die Herstellungskosten in Variante 2 höher als bei Variante 1. Dies erweckt den Anschein, dass Variante 1 in Bezug auf die Herstellungskosten die bessere Investitionsalternative sei.

Die Ermittlung der Planungskosten erfolgt gemäß dem ~~„Besonderen Teil der Honorarleitlinie Bauwesen Ingenieurbauwerke, Planung und örtliche Bauaufsicht“~~ Die Planungskos-

ten umfassen die Kosten für die Planung sowie die der örtlichen Bauaufsicht und werden folgendermaßen berechnet:

Honorar für die Planung = Errichtungskosten * Honorarsatz für die Planung * Planungsfaktor p ¹²⁰

Honorar für die örtliche Bauaufsicht = Errichtungskosten * Honorarsatz für die örtliche Bauaufsicht * Planungsfaktor b ¹²¹

In der Honorarleitlinie erfolgt die Ermittlung von Planungsfaktor und Bauaufsichtsfaktor aufgrund einer Klasseneinteilung, wobei Tunnelanlagen und deren technische Ausrüstung in die Klasse 2 fallen. Demzufolge betragen der Planungsfaktor $p = 1,25$ und der Bauaufsichtsfaktor $b = 1,1$.¹²²

Die Honorarsätze werden aus Tabellen der Honorarleitlinie entnommen und richten sich nach den jeweiligen Errichtungskosten. Für Variante 1 mit den Errichtungskosten von " 478.028,67 werden der Honorarsatz für die örtliche Bauaufsicht von 3,939 % und der Honorarsatz für die Planung von 5,061 % aus der entsprechenden Tabelle entnommen. Für Variante 2 mit den Errichtungskosten von " 606.987,36 werden der Honorarsatz für die örtliche Bauaufsicht von 3,782 % und der Honorarsatz für die Planung von 4,900 % aus der entsprechenden Tabelle entnommen.¹²³

Berechnung Planungskosten . Variante 1: Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern:

Planungshonorar Variante 1 = " 478.028,67 * 5,061 % * 1,25 = " 30.241,29

Honorar für die örtliche Bauaufsicht Variante 1 = " 478.028,67 * 3,939 % * 1,1 =

" 20.712,50

Planungskosten Variante 1 = " 30.241,29 + " 20.712,50 = " 50.953,79

¹²⁰ Vgl. HOB-I (2004), S. 4.

¹²¹ Vgl. ebda.

¹²² Vgl. ebda., S. 29 f.

¹²³ Vgl. ebda., S. 26 ff.

Berechnung Planungskosten . Variante 2: Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen:

Planungshonorar Variante 2 = " $606.987,36 * 4,900 \% * 1,25 =$ " 37.177,98

Honorar für die örtliche Bauaufsicht Variante 2 = " $606.987,36 * 3,782 \% * 1,1 =$

" 25.251,89

Planungskosten Variante 2 = " $37.177,98 +$ " 25.251,89 = " 62.429,87

Die Planungskosten für die jeweilige Variante ergeben sich somit aus der Summe des Honorars für die örtliche Bauaufsicht und des Planungshonorars und betragen für Variante 1 " 50.953,79 und für Variante 2 " 62.429,87. Demnach stellt Variante 1 die günstigere Option dar. Dies ist mitunter darauf zurückzuführen, dass die Planungskosten anhand der Errichtungskosten ermittelt werden und diese bei Variante 1 geringer sind als bei Variante 2.

4.1.2 Betriebsphase

In der Betriebsphase werden bei dieser Betrachtung die Instandhaltungskosten und die Energiekosten der jeweiligen Variante erfasst und ermittelt. Hinsichtlich der Instandhaltungskosten werden hier nur die direkten Instandhaltungskosten pro Jahr ermittelt. Diese umfassen, wie in Punkt 2.2.4 bereits dargelegt, die eigentlichen Instandhaltungsmaßnahmen, wie Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. Instandhaltungsmaßnahmen zur Verbesserung werden an dieser Stelle nicht betrachtet.

Anhand der in Punkt 3.2.4 erfassten Anzahl der Systemkomponenten für Variante 1, Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern, und Variante 2, Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen, erfolgt die Ermittlung der jährlichen Instandhaltungskosten. Die Preise für die Instandhaltungsmaßnahmen entstammen einem firmeninternen Rahmenvertrag. Für die Instandsetzung wird die Annahme getroffen, dass pro Anlage eine Nichtverfügbarkeit von sechs Stunden pro Jahr gegeben ist. Diese Annahme beruht auf dem Merkblatt

Verfügbarkeit von Brandmeldeanlagen¹²⁴ Da über die Instandsetzungskosten für Ersatzteile keine detaillierten Angaben vorliegen, wird aufgrund von praktischen Erfahrungswerten von einer Ersatzteilkpauschale pro Anlage und Jahr von " 200,- ausgegangen. Wie bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben, werden die Instandhaltungsmaßnahmen für Wartung und Inspektion gemäß ÖNORM F3070 durchgeführt. Für die gemäß ÖNORM F3070 erforderliche 24-Stunden-Rufbereitschaft wird eine entsprechende Monatspauschale berücksichtigt.¹²⁵ Die Inspektionsmaßnahmen des Betreibers werden bei der Erfassung der Instandhaltungskosten nicht berücksichtigt, da diese aufgrund der Verwendung eines übergeordneten Leitstandsystems für die Tunnelanlagen nicht erforderlich sind.

Tabelle 3: Jährliche Instandhaltungskosten Variante 1, Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern

Bezeichnung	Menge	Einheit	Preis/Menge	Preis/Position
BMZ als Unterzentrale (Tunnelsituation) Wartung und Inspektion	68	Stk.	300,89	20.460,52
Sonst. opt. u. therm. Rauchmelder (TS) Wartung und Inspektion	662	Stk.	5,37	3.554,94
Instandsetzung: Entstörungspauschale 3 bis 6 Stunden	68	Pa.	320,46	21.791,28
Instandsetzung: Bereitschaft Servicerufpauschale (Monatspauschale)	12	Pa.	274,40	3.292,80
Instandsetzung: Ersatzteile für Entstörung	68	Pa.	200,00	13.600,00
Gesamtsumme				62.699,54

Tabelle 4: Jährliche Instandhaltungskosten Variante 2, Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen

Bezeichnung	Menge	Einheit	Preis/Menge	Preis/Position
Rauchansaugsystem Zentrale Wartung und Inspektion	68	Stk.	26,71	1.816,28
Rauchansaugsystem Melder Wartung und Inspektion	662	Stk.	6,16	4.077,92
Instandsetzung: Entstörungspauschale 3 bis 6 Stunden	68	Pa.	320,46	21.791,28
Instandsetzung: Bereitschaft Servicerufpauschale (Monatspauschale)	12	Pa.	274,40	3.292,80
Instandsetzung: Ersatzteile für Entstörung	68	Pa.	200,00	13.600,00
Gesamtsumme				44.578,28

¹²⁴ Vgl. ZVEI (2012), S. 11 f.

¹²⁵ Vgl. ÖNORM F3070 (2010), S. 30.

Die Tabelle 3 zeigt die jährlichen Instandhaltungskosten für Variante 1 und die Tabelle 4 zeigt die jährlichen Instandhaltungskosten für Variante 2. Ein Vergleich dieser beiden Tabellen ergibt, dass die Instandhaltungskosten bei Variante 2 niedriger sind als jene bei Variante 1.

In der Betriebsphase werden neben den Instandhaltungskosten auch die Energiekosten berücksichtigt. Zur Ermittlung der Energiekosten wird im ersten Schritt die Stromaufnahme der Systemkomponenten der jeweiligen Varianten ermittelt. Diese erfolgen aufgrund von Herstellerangaben. Anhand der Stromaufnahme wird im nächsten Schritt der Strombedarf pro Jahr und pro Anlage ermittelt. Der Strompreis wird gemäß der Angaben der E-Control sStrompreise für Gewerbekunden% mit einem gewichteten Durchschnittswert von 6,090 c/kWh (0,0609 "/kWh) angenommen.¹²⁶

Berechnung Energiekosten . Variante 1: Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern:

Stromaufnahme: $I_1 = 0,34 \text{ A}$ (bei Spannung $U_1 = 12 \text{ V}$)¹²⁷

Leistungsaufnahme: $P_1 = I_1 \times U_1 = 0,34 \text{ A} \times 12 \text{ V} = 4,08 \text{ W}$

Strombedarf pro Jahr: $8760 \text{ h} \times 4,08 \text{ W} = 42,05 \text{ kWh}$

Energiekosten pro Jahr: $42,05 \text{ kWh} \times 0,0609 \text{ "/kWh} = \text{" } 2,56$

Energiekosten pro Jahr für 68 Brandmeldezentralen: $68 \times \text{" } 2,56 = \text{" } 174,15$

¹²⁶ Vgl. E-Control (2015).

¹²⁷ Vgl. IGS (2015).

Berechnung Energiekosten . Variante 2: Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen:

Stromaufnahme: $I_2 = 0,24 \text{ A}$ (bei Spannung $U_2 = 24 \text{ V}$)¹²⁸

Leistungsaufnahme: $P_2 = I_2 \times U_2 = 0,24 \text{ A} \times 24 \text{ V} = 5,76 \text{ W}$

Strombedarf pro Jahr: $8760 \text{ h} \times 5,76 \text{ W} = 50,46 \text{ kWh}$

Energiekosten pro Jahr: $50,46 \text{ kWh} \times 0,0609 \text{ "/kWh} = " 3,07$

Energiekosten pro Jahr für 68 Rauchansaugsystemzentralen: $68 \times " 3,07 = " 208,76$

Die Energiekosten für Variante 1 betragen pro Jahr " 174,15. Die Energiekosten für Variante 2 belaufen sich jährlich auf " 208,76. Somit ist die Variante 1 im Vergleich die günstigere Variante. Da die ermittelten Energiekosten jedoch bei beiden Varianten äußerst gering sind, fallen sie im Gegensatz zu den anderen bisher erfassten Kosten kaum ins Gewicht.

4.1.3 Neuerrichtung

Die wirtschaftliche Nutzungsdauer eines Eisenbahntunnels beträgt laut Bundesministerium für Finanzen 70 Jahre.¹²⁹ Für die wirtschaftliche Nutzungsdauer von Brandmeldeanlagen liegen hingegen unterschiedliche Angaben vor. Der Brandschutz-Wegweiser der Firma Siemens schätzt die wirtschaftliche Nutzungsdauer von Brandmeldeanlagen zwischen sechs und 15 Jahren, während Unterlagen der BTE darauf hinweisen, dass die wirtschaftliche Nutzungsdauer zwischen 15 und 30 Jahren liegt.¹³⁰ Diese Abweichungen in der Nutzungsdauer lassen sich durch die Besonderheiten der verschiedenen Typen von Brandmeldeanlagen erklären. Für die vorliegende Arbeit wird die wirtschaftliche Nutzungsdauer von Brandmeldeanlagen mit 20 Jahren angenommen. Bei Betrachtung der Lebenszyklus-

¹²⁸ Vgl. Wagner (2009), S. 3.

¹²⁹ Vgl. BMF (2010), S. 1.

¹³⁰ Vgl. Siemens (2013), S. 155 ff. ; Vgl. BTE (2010), S. 11.

kosten wird die wirtschaftliche Nutzungsdauer des Tunnels herangezogen. Demzufolge sind die Brandmeldeanlagen alle 20 Jahre neu zu errichten.

Bei der Neuerrichtung der Brandmeldeanlagen weisen einige Bauteile, wie zum Beispiel elektrische Leitungen, Installationsrohre und das Rohrsystem der Rauchansaugsysteme, eine Nutzungsdauer von 50 Jahren auf.¹³¹ Aus diesem Grund werden diese Bauteile im Zuge der Neuerrichtung der Brandmeldeanlagen . entsprechend dem Erneuerungszyklus von 20 Jahren . erst nach 40 Jahren erneuert werden. Demzufolge betragen die Kosten für die Neuerrichtung der Brandmeldeanlagen nach 20 Jahren für die Variante 1 " 444.289,62 und für die Variante 2 " 583.407,36. Die Ermittlung dieser Beträge ist jeweils in den nachstehenden Tabellen 5 und 6 nachzulesen.

Tabelle 5: Neuerrichtungskosten nach 20 Jahren für Variante 1

Bezeichnung	Menge	Einheit	Preis/Menge	Preis/Position
Brandmeldezentrale (Zentrale mit 2 Ringlinien, Vernetzung)	68	Stk.	1.263,58	85.923,44
LWL-Konverter für Vernetzung BMZ	68	Stk.	2.643,56	179.762,08
Brandmelder inkl. Sockel	662	Stk.	71,25	47.167,50
Montage Brandmelder	662	Stk.	19,30	12.776,60
Montage BMZ	68	Stk.	245,00	16.660,00
Inbetriebnahme BMZ	68	Stk.	1.500,00	102.000,00
Gesamtsumme				444.289,62

Tabelle 6: Neuerrichtungskosten nach 20 Jahren für Variante 2

Bezeichnung	Menge	Einheit	Preis/Menge	Preis/Position
RAS-Zentrale (Kondensatabscheider, Kugelhahn, Netzteil)	68	Stk.	4.190,96	284.985,28
LWL-Konverter für Vernetzung RAS-Zentrale	68	Stk.	2.643,56	179.762,08
Montage RAS	68	Stk.	245,00	16.660,00
Inbetriebnahme RAS	68	Stk.	1.500,00	102.000,00
Gesamtsumme				583.407,36

¹³¹ Vgl. BTE (2010), S. 8.

Die Ermittlung der Planungskosten für die Neuerrichtung der Brandmeldeanlagen nach 20 Jahren erfolgt nach demselben Schema wie in Kapitel 4.3.1.

Berechnung Planungskosten . Variante 1: Brandmeldeanlagen mit Punktmeldern:

Planungshonorar Variante 1 = " $444.289,62 \cdot 5,061 \% \cdot 1,25 =$ " 28.106,87

Honorar für die örtliche Bauaufsicht Variante 1 = " $444.289,62 \cdot 3,939 \% \cdot 1,1 =$

" 19.205,62

Planungskosten Variante 1 = " $28.106,87 +$ " 19.205,62 = " 47.312,49

Berechnung Planungskosten . Variante 2: Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen:

Planungshonorar Variante 2 = " $583.407,36 \cdot 4,900 \% \cdot 1,25 =$ " 35.733,70

Honorar für die örtliche Bauaufsicht Variante 2 = " $583.407,36 \cdot 3,782 \% \cdot 1,1 =$

" 24.270,91

Planungskosten Variante 2 = " $35.733,70 +$ " 24.270,91 = " 60.004,61

Die Planungskosten für die jeweilige Variante ergeben sich somit aus der Summe des Honorars für die örtliche Bauaufsicht und des Planungshonorars und betragen für Variante 1 " 47.312,49 und für Variante 2 " 60.004,61. Demnach stellt Variante 1 die wesentlich günstigere Variante dar. Dies ist mitunter darauf zurückzuführen, dass die Planungskosten anhand der Errichtungskosten ermittelt werden und diese bei Variante 1 geringer sind als bei Variante 2.

Für die Neuerrichtungen der Brandmeldeanlagen nach 40 und 60 Jahren werden die Planungs- und Errichtungskosten je Variante gemäß Punkt 4.3.1 angesetzt.

4.2 Anwendung am Beispiel des Koralmtunnel

Für dieses Praxisbeispiel wird in Anlehnung an Kapitel 2.1.5 die Kapitalwertmethode zur Berechnung der Lebenszykluskosten herangezogen. Wie bereits dargelegt, umfasst der Kapitalwert die Summe sämtlicher Nettozahlungen bzw. Periodengewinne einer Investition, welche auf einen bestimmten Zeitpunkt auf- bzw. abgezinst werden. In der in dieser Arbeit vorgenommenen Berechnung des Kapitalwerts wird der Bezugszeitpunkt ($t = 0$) zu Beginn des betrachteten Zeitraums des Investitionsgegenstandes festgelegt. Da es bei diesen Investitionsvorhaben keine Erlöse gibt, werden nur die Kosten berücksichtigt. Zu diesen berücksichtigten Kosten zählen die in Kapitel 4.3 ermittelten Planungs- und Errichtungskosten, die Instandhaltungskosten sowie die Energie- und Neuerrichtungskosten je Variante. Demzufolge entspricht der Kapitalwert der Summe sämtlicher auf den Zeitpunkt $t = 0$ abgezinsten Periodenfehlbeträge des betrachteten Zeitraums T .

Im Zuge des Vergleichs der zwei betrachteten Varianten erweist sich jener Investitionsgegenstand als relativ vorteilhaft, welcher den größten Kapitalwert vorweisen kann. In dieser Berechnung wird davon ausgegangen, dass der betrachtete Zeitraum T der wirtschaftlichen Nutzungsdauer des Koralmtunnels mit 70 Jahren entspricht. Da die wirtschaftliche Nutzungsdauer von Brandmeldeanlagen 20 Jahre beträgt, fließt in die Berechnung auch die Neuerrichtung der Brandmeldeanlagen alle 20 Jahre mit ein. Da der Koralmtunnel voraussichtlich nach 70 Jahren saniert und die Brandmeldeanlagen nach 60 Jahren neu errichtet werden müssen, überschneidet sich die wirtschaftliche Nutzungsdauer der Brandmeldeanlagen mit der Sanierung des Tunnels. Der allfällige Restwert der Brandmeldeanlagen wird in der Berechnung nicht weiter berücksichtigt, da er keine wesentlichen Auswirkungen auf die zwei Investitionsvarianten hat und für deren Vergleich daher nicht relevant ist.

Wie bereits in Punkt 2.1.5 dargelegt wurde, hat der Kalkulationszinssatz einen großen Einfluss auf die Investitionsentscheidungen. Je höher der Kalkulationszinssatz festgelegt wird, desto geringer sind die Auswirkungen der in der Zukunft liegenden Periodenfehlbeträge, wenn die Abzinsung zum Zeitpunkt $t = 0$ erfolgt. Zum Zwecke der Berechnung wurde . entsprechend firmeninterner Vorgaben . ein Kalkulationszinssatz von 3 % ausgewählt. Die vollständigen Berechnungen aus diesem Abschnitt befinden sich im Anhang.

In Tabelle 7 wird die Berechnung des Kapitalwerts für Variante 1 dargestellt. Alle 20 Jahre erfolgt eine Neuerrichtung der Brandmeldeanlagen, wobei in der Spalte „Periodenfehlbetrag“ ersichtlich ist, dass die Neuerrichtung in Periode 20, wie in Kapitel 4.3.3 bereits be-

schrieben, aufgrund der Wiederverwendung einiger Bauteile weniger kostet. Die Neuerichtungen in den Perioden 40 und 60 entsprechen wieder den Planungs- und Errichtungskosten gemäß Punkt 4.3.1. In den restlichen Perioden wurden die Instandhaltungs- und Energiekosten gemäß Kapitel 4.3.2 berücksichtigt. Das Ergebnis der Berechnung zeigt einen negativen Kapitalwert in der Höhe von " -2.819.458,87.

Tabelle 7: Kapitalwertberechnung Variante 1 (mit $i = 3\%$)

Periode	Periodenfehlbetrag	Abzinsungsfaktor (mit $i = 3\%$)	Barwert
0	- 528.982,46		
1	- 62.873,69	0,970873786	- 61.042,42
2	- 62.873,69	0,942595909	- 59.264,48
3	- 62.873,69	0,915141659	- 57.538,33
4	- 62.873,69	0,888487048	- 55.862,46
5	- 62.873,69	0,862608784	- 54.235,40
6	- 62.873,69	0,837484257	- 52.655,73
7	- 62.873,69	0,813091511	- 51.122,06
8	- 62.873,69	0,789409234	- 49.633,07
9	- 62.873,69	0,766416732	- 48.187,45
10	- 62.873,69	0,744093915	- 46.783,93
11	- 62.873,69	0,722421277	- 45.421,29
12	- 62.873,69	0,70137988	- 44.098,34
13	- 62.873,69	0,68095134	- 42.813,92
14	- 62.873,69	0,661117806	- 41.566,92
15	- 62.873,69	0,641861947	- 40.356,23
16	- 62.873,69	0,623166939	- 39.180,80
17	- 62.873,69	0,605016446	- 38.039,62
18	- 62.873,69	0,587394608	- 36.931,67
19	- 62.873,69	0,570286027	- 35.855,99
20	- 491.602,11	0,553675754	- 272.188,17
ō	ō	ō	ō
30	- 62.873,69	0,41198676	- 25.903,13
ō	ō	ō	ō
40	- 528.982,46	0,306556841	- 162.163,19
ō	ō	ō	ō
50	- 62.873,69	0,22810708	- 14.341,93
ō	ō	ō	ō
60	- 528.982,46	0,16973309	- 89.785,83
ō	ō	ō	ō
70	- 62.873,69	0,126297359	- 7.940,78
		Anschaffungsauszahlung	- 528.982,46
		Kapitalwert	- 2.819.458,87

Tabelle 8 zeigt die Berechnung des Kapitalwerts für Variante 2. Bei dieser Berechnung verhält es sich mit den Neuerrichtungen nach 20, 40 und 60 Jahren genauso wie bei der Berechnung für Variante 1 in Tabelle 7. In den restlichen Perioden wurden die Instandhaltungs- und Energiekosten gemäß Kapitel 4.3.2 berücksichtigt. Das Ergebnis der Berechnung ergibt einen negativen Kapitalwert in der Höhe von " -2.602.718,25.

Tabelle 8: Kapitalwertberechnung Variante 2 (mit $i = 3\%$)

Periode	Periodenfehlbetrag	Abzinsungsfaktor (mit $i = 3\%$)	Barwert
0	- 669.417,23	-	
1	- 44.787,04	0,970873786	- 43.482,56
2	- 44.787,04	0,942595909	- 42.216,08
3	- 44.787,04	0,915141659	- 40.986,49
4	- 44.787,04	0,888487048	- 39.792,70
5	- 44.787,04	0,862608784	- 38.633,69
6	- 44.787,04	0,837484257	- 37.508,44
7	- 44.787,04	0,813091511	- 36.415,96
8	- 44.787,04	0,789409234	- 35.355,30
9	- 44.787,04	0,766416732	- 34.325,54
10	- 44.787,04	0,744093915	- 33.325,76
11	- 44.787,04	0,722421277	- 32.355,11
12	- 44.787,04	0,70137988	- 31.412,73
13	- 44.787,04	0,68095134	- 30.497,79
14	- 44.787,04	0,661117806	- 29.609,51
15	- 44.787,04	0,641861947	- 28.747,10
16	- 44.787,04	0,623166939	- 27.909,80
17	- 44.787,04	0,605016446	- 27.096,90
18	- 44.787,04	0,587394608	- 26.307,67
19	- 44.787,04	0,570286027	- 25.541,42
20	- 643.411,97	0,553675754	- 356.241,61
0	0	0	0
30	- 44.787,04	0,41198676	- 18.451,67
0	0	0	0
40	- 669.417,23	0,306556841	- 205.214,43
0	0	0	0
50	- 44.787,04	0,22810708	- 10.216,24
0	0	0	0
60	- 669.417,23	0,16973309	- 113.622,25
0	0	0	0
70	- 44.787,04	0,126297359	- 5.656,48
		Anschaffungsauszahlung	- 669.417,23
		Kapitalwert	- 2.602.718,25

Ein Vergleich dieser beiden Ergebnisse zeigt, dass Variante 2 nach dieser Berechnung die bessere Alternative ist, da der Kapitalwert der Variante 2 größer ist als jener der Variante 1. Würden, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, nur die einmaligen Planungs- und Errichtungskosten berücksichtigt, so wirkt die Variante 1 als die bessere Variante aufgrund der niedrigeren Planungs- und Errichtungskosten. Da in der Lebenszykluskostenrechnung auch die laufenden Instandhaltungs- und Energiekosten berücksichtigt werden und diese bei Variante 1 höher sind, erscheint die Variante 2 gemäß der durchgeführten Kapitalwertberechnung hier als die bessere Alternative. Obwohl die Neuerrichtungskosten der Variante 2 höher sind als bei Variante 1, wirkt sich dies im Zuge der Berechnung nicht entscheidend auf das Ergebnis aus. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die in der Zukunft liegenden Neuerrichtungskosten zum Zeitpunkt $t = 0$ durch die Abzinsung geringere Auswirkungen auf das Ergebnis haben.

In einem weiteren Schritt soll erfasst werden, wie sich das Gesamtergebnis verändert, wenn ein höherer Kalkulationszinssatz verwendet wird. Es wird die Annahme getroffen, dass bei einem höheren Kalkulationszinssatz aufgrund der Abzinsung zum Zeitpunkt $t = 0$ die Auswirkung der zukünftigen Instandhaltungs- und Energiekosten der Variante 1 geringer ausfällt. Demzufolge werden die Berechnungen mit einem Kalkulationszinssatz von 11,25 % durchgeführt.

Tabelle 9 zeigt die Kapitalwertberechnung der Variante 1 mit einem Kalkulationszinssatz von 11,25 %. Das Ergebnis ist ein Kapitalwert von " -1.145.706,89.

Tabelle 9: Kapitalwertberechnung Variante 1 (mit $i = 11,25\%$)

Periode	Periodenfehlbetrag	Abzinsungsfaktor (mit $i = 11,25\%$)	Barwert
0	- 528.982,46		
1	- 62.873,69	0,898876404	- 56.515,68
2	- 62.873,69	0,807978791	- 50.800,61
3	- 62.873,69	0,72627307	- 45.663,47
4	- 62.873,69	0,652829726	- 41.045,81
5	- 62.873,69	0,586813237	- 36.895,11
6	- 62.873,69	0,527472572	- 33.164,15
7	- 62.873,69	0,474132649	- 29.810,47
8	- 62.873,69	0,426186651	- 26.795,93
9	- 62.873,69	0,383089125	- 24.086,23
10	- 62.873,69	0,344349775	- 21.650,54
11	- 62.873,69	0,309527888	- 19.461,16
12	- 62.873,69	0,278227315	- 17.493,18
13	- 62.873,69	0,250091968	- 15.724,20
14	- 62.873,69	0,224801769	- 14.134,12
15	- 62.873,69	0,202069006	- 12.704,82
16	- 62.873,69	0,181635062	- 11.420,07
17	- 62.873,69	0,163267471	- 10.265,23
18	- 62.873,69	0,146757277	- 9.227,17
19	- 62.873,69	0,131916654	- 8.294,09
20	- 491.602,11	0,118576767	- 58.292,59
..	0	0	0
30	- 62.873,69	0,040831883	- 2.567,25
..	0	0	0
40	- 528.982,46	0,01406045	- 7.437,73
..	0	0	0
50	- 62.873,69	0,004841713	- 304,42
..	0	0	0
60	- 528.982,46	0,001667243	- 881,94
..	0	0	0
70	- 62.873,69	0,000574115	- 36,10
		Anschaffungsauszahlung	- 528.982,46
		Kapitalwert	- 1.145.706,89

Tabelle 10 zeigt die Kapitalwertberechnung der Variante 2 mit einem Kalkulationszinssatz von 11,25 %. Das Ergebnis ist ein Kapitalwert von " -1.148.102,69. Demnach ist bei einem Kalkulationszinssatz von 11,25 % die Variante 1 die vorteilhaftere, wobei ein Prozentsatz in der Höhe von 11,25 % in der Praxis als absolut unrealistisch betrachtet werden muss.

Tabelle 10: Kapitalwertberechnung Variante 2 (mit $i = 11,25\%$)

Periode	Periodenfehlbetrag	Abzinsungsfaktor (mit $i = 11,25\%$)	Barwert
0	- 669.417,23	-	
1	- 44.787,04	0,898876404	- 40.258,01
2	- 44.787,04	0,807978791	- 36.186,98
3	- 44.787,04	0,72627307	- 32.527,62
4	- 44.787,04	0,652829726	- 29.238,31
5	- 44.787,04	0,586813237	- 26.281,63
6	- 44.787,04	0,527472572	- 23.623,94
7	- 44.787,04	0,474132649	- 21.235,00
8	- 44.787,04	0,426186651	- 19.087,64
9	- 44.787,04	0,383089125	- 17.157,43
10	- 44.787,04	0,344349775	- 15.422,41
11	- 44.787,04	0,309527888	- 13.862,84
12	- 44.787,04	0,278227315	- 12.460,98
13	- 44.787,04	0,250091968	- 11.200,88
14	- 44.787,04	0,224801769	- 10.068,21
15	- 44.787,04	0,202069006	- 9.050,07
16	- 44.787,04	0,181635062	- 8.134,90
17	- 44.787,04	0,163267471	- 7.312,27
18	- 44.787,04	0,146757277	- 6.572,82
19	- 44.787,04	0,131916654	- 5.908,16
20	- 643.411,97	0,118576767	- 76.293,71
∞	∞	∞	∞
30	- 44.787,04	0,040831883	- 1.828,74
∞	∞	∞	∞
40	- 669.417,23	0,01406045	- 9.412,31
∞	∞	∞	∞
50	- 44.787,04	0,004841713	- 216,85
∞	∞	∞	∞
60	- 669.417,23	0,001667243	- 1.116,08
∞	∞	∞	∞
70	- 44.787,04	0,000574115	- 25,71
		Anschaffungsauszahlung	- 669.417,23
		Kapitalwert	- 1.148.102,69

Unter Annahme eines realistischen Kalkulationszinssatzes stellt die Variante 2 wirtschaftlich die bessere Option dar. In weiterer Folge sollen anhand einer Endwertberechnung die gesamten Lebenszykluskosten über die Nutzungsdauer des Koralmtunnels von 70 Jahren berechnet werden. Hierbei wird . gemäß firmeninterner Vorgaben . ein Kalkulationszinssatz von 3 % angenommen. Die nachstehenden Tabelle 11 und 12 zeigen die Endwertberechnung je Variante.

Tabelle 11: Endwertberechnung Variante 1 (mit $i = 3\%$)

Periode	Kosten	Aufzinsungsfaktor (mit $i = 3\%$)	Endwert
0	528.982,46		528.982,46
1	62.873,69	1,03	64.759,90
2	62.873,69	1,0609	66.702,70
3	62.873,69	1,092727	68.703,78
4	62.873,69	1,12550881	70.764,89
5	62.873,69	1,159274074	72.887,84
6	62.873,69	1,194052297	75.074,47
7	62.873,69	1,229873865	77.326,71
8	62.873,69	1,266770081	79.646,51
9	62.873,69	1,304773184	82.035,90
10	62.873,69	1,343916379	84.496,98
11	62.873,69	1,384233871	87.031,89
12	62.873,69	1,425760887	89.642,85
13	62.873,69	1,468533713	92.332,13
14	62.873,69	1,512589725	95.102,10
15	62.873,69	1,557967417	97.955,16
16	62.873,69	1,604706439	100.893,82
17	62.873,69	1,652847632	103.920,63
18	62.873,69	1,702433061	107.038,25
19	62.873,69	1,753506053	110.249,40
20	491.602,11	1,806111235	887.888,09
0	0	0	0
30	62.873,69	2,427262471	152.610,95
0	0	0	0
40	528.982,46	3,262037792	1.725.560,78
0	0	0	0
50	62.873,69	4,383906019	275.632,35
0	0	0	0
60	528.982,46	5,891603104	3.116.554,70
0	0	0	0
70	62.873,69	7,917821912	497.822,68
		Gesamtsumme Endwerte	19.974.172,18

Tabelle 12: Endwertberechnung Variante 2 (mit $i = 3\%$)

Periode	Kosten	Aufzinsungsfaktor (mit $i = 3\%$)	Endwert
0	669.417,23		669.417,23
1	44.787,04	1,03	46.130,65
2	44.787,04	1,0609	47.514,57
3	44.787,04	1,092727	48.940,01
4	44.787,04	1,12550881	50.408,21
5	44.787,04	1,159274074	51.920,45
6	44.787,04	1,194052297	53.478,07
7	44.787,04	1,229873865	55.082,41
8	44.787,04	1,266770081	56.734,88
9	44.787,04	1,304773184	58.436,93
10	44.787,04	1,343916379	60.190,04
11	44.787,04	1,384233871	61.995,74
12	44.787,04	1,425760887	63.855,61
13	44.787,04	1,468533713	65.771,28
14	44.787,04	1,512589725	67.744,42
15	44.787,04	1,557967417	69.776,75
16	44.787,04	1,604706439	71.870,05
17	44.787,04	1,652847632	74.026,15
18	44.787,04	1,702433061	76.246,94
19	44.787,04	1,753506053	78.534,35
20	643.411,97	1,806111235	1.162.073,59
ō	ō	ō	ō
30	44.787,04	2,427262471	108.709,90
ō	ō	ō	ō
40	669.417,23	3,262037792	2.183.664,30
ō	ō	ō	ō
50	44.787,04	4,383906019	196.342,17
ō	ō	ō	ō
60	669.417,23	5,891603104	3.943.940,63
ō	ō	ō	ō
70	44.787,04	7,917821912	354.615,81
		Gesamtsumme Endwerte	18.105.695,22

Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse dient das Diagramm in Abbildung 13, welches die Lebenszykluskosten beider Varianten über einen Zeitraum von 70 Jahren zeigt.

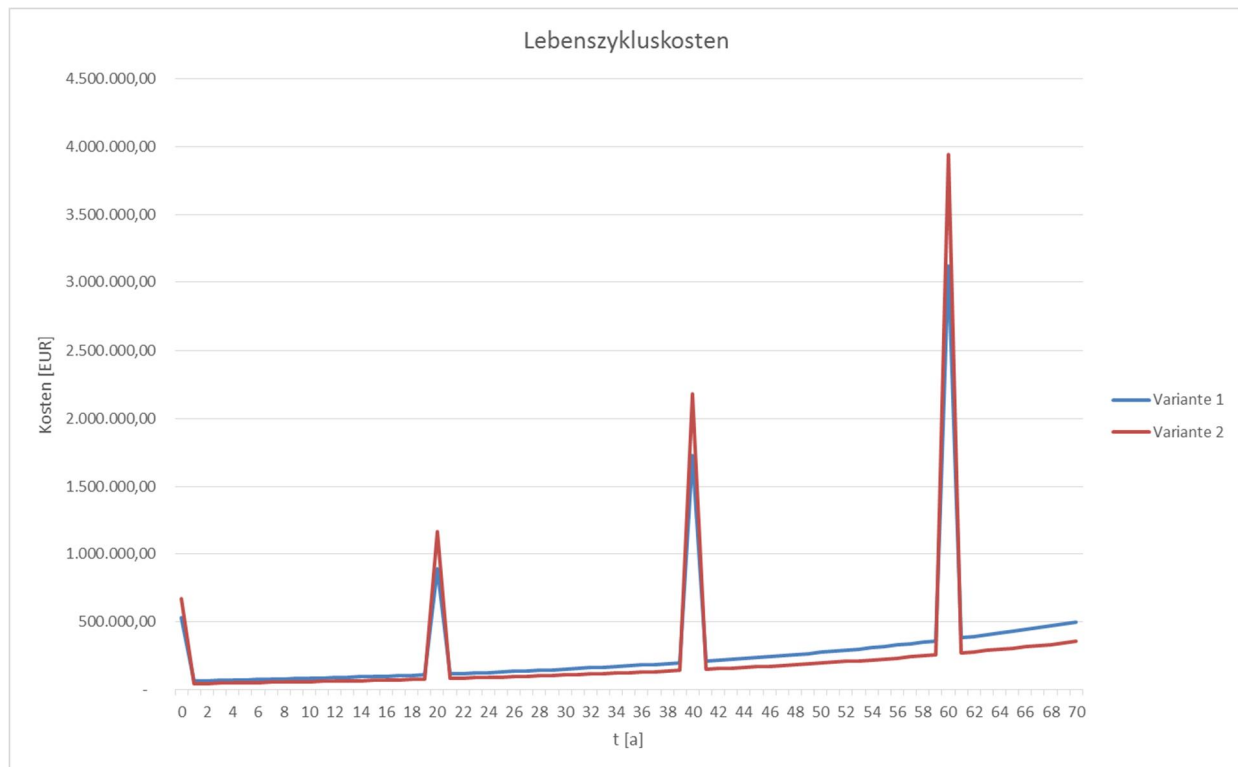


Abbildung 13: Darstellung der Lebenszykluskosten

Die Endwertberechnung ergibt bei Variante 1 die Lebenszykluskosten von " 19.974.172,18 zum Zeitpunkt T der wirtschaftlichen Nutzungsdauer des Koralmtunnels von 70 Jahren. Bei Variante 2 beläuft sich dieser Betrag auf " 18.105.695,22. Demzufolge führt die Verwendung der Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen, also Variante 2, am Ende der gesamten wirtschaftlichen Nutzungsdauer des Koralmtunnels zu einer Kostenersparnis von " 1.868.476,69. Diese Kostenersparnis untermauert die Schlussfolgerung, dass die Variante 2, langfristig betrachtet, die bessere Investition darstellt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse folgt im nachstehenden Kapitel.

5 Schlussbetrachtung

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit gewonnen Ergebnisse in Bezug auf die Problemstellung zusammengefasst und aufgrund der Erkenntnisse mögliche Maßnahmen abgeleitet. Abschließend werden Konsequenzen aus den erlangten Erfahrungen formuliert.

5.1 Ergebnisse und Maßnahmen

Das Ergebnis der durchgeführten Lebenszykluskostenrechnung zeigt auf, dass bei Investitionsentscheidungen nicht nur die Planungs- und Errichtungskosten, sondern auch die Kosten der Betriebsphase, insbesondere die Instandhaltungskosten, berücksichtigt werden sollen, um eine wirtschaftlich optimale Entscheidung zu treffen. Dies bestätigt die in der Literatur als Trade-Off bezeichnete Austauschbeziehung zwischen Planungs- bzw. Entwicklungskosten und Instandhaltungskosten. Durch höhere Planungs- und Entwicklungskosten ist es möglich, instandhaltungsärmere Systemkomponenten einzusetzen, wodurch die Instandhaltungskosten gesenkt werden können. Die Verwendung von Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen (= Variante 2) weist zwar höhere Planungs- und Errichtungskosten auf, ist jedoch aufgrund der instandhaltungsärmeren Konstruktion kostengünstiger in der Instandhaltung.

Brandmeldeanlagen mit Rauchansaugsystemen stellen im wirtschaftlichen Vergleich die beste Option dar, da sich über die gesamte Nutzungsdauer des Koralmtunnels eine Kostenersparnis von rund " 1,9 Millionen ergibt. Infolgedessen wird empfohlen, diese im Koralmtunnel einzusetzen.

5.2 Konsequenzen

Den Ergebnissen zufolge wird der ÖBB-Infrastruktur AG empfohlen, bei zukünftigen Infrastrukturprojekten eine Lebenszykluskostenbetrachtung durchzuführen. Im Zuge dessen soll vermieden werden, in der Anschaffung bzw. Errichtung günstige Infrastrukturanlagen fälschlicherweise automatisch als die bessere Option zu bewerten. Wie die vorliegende Arbeit aufzeigt, kann eine langfristige Betrachtung unter Berücksichtigung aller anfallenden Kosten im Zuge des Lebenszyklus einer Infrastrukturanlage wirtschaftlich zielführender sein. Schlussfolgernd ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse die Aussage zutreffend, dass für die ÖBB-Infrastruktur AG bei der technischen Ausrüstung des Koralmtunnels ein hohes Einsparungspotenzial besteht.

Literatur

Alcalde Rasch, Alejandro: Erfolgspotential Instandhaltung: theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements - Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2000.

Bauer, Stefan: Optimierte Controlling in der Instandhaltung am Beispiel der Balanced Scorecard - München: GRIN Verlag, 2008.

Becher, Clemens: Life Cycle Costing: Ein effektives Konzept zur Unterstützung strategischer Portfolio-Entscheidungen. In: Controller Magazin. - Freiburg: Haufe Mediengruppe. - 38 (2013) 6, S. 58-61.

Betz, Stefan: Lebenszyklusorientierte Investitionsplanung. In: Der Betrieb. - Düsseldorf: Handelsblatt Fachmedien GmbH. - 63 (2010) 17, Seite 912 - 916.

BMF - Bundesministerium für Finanzen: Tabelle über die Nutzungsdauer von Sachanlagen und immateriellen Gütern - GZ. BMF-1 11500/0016-V/3/2010 - Anlagenkennzahlen mit den Nutzungsdauerwerten. URL:

<https://www.bmbf.gv.at/ministerium/rs/2010_27_beilage2_20004.pdf?4e4zxz>, verfügbar am 21.04.2016.

BTE - Bund Technischer Experten e.V.: Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte. URL:

<<https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjYwL-Im6fMAhWBAMAKHVXICvQQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.svrenz.de%2Fdownloadfile.php%253Ffile%253Dlebensdauer-von-bauteilen%2C->

zeitwer-

te.pdf&usg=AFQjCNG6jHCzqN5ZH5_K02fGeSJ8QQESdQ&sig2=Ct_cLWdIYgvaschyGuC21g>, verfügbar am 21.04.2016.

Bundesbahngesetz 1992 in der Fassung vom 12.09.2015.

DIN EN 31051: Grundlagen der Instandhaltung - Ausgabe September 2012 - Berlin: Beuth Verlag, 2012.

E-Control - Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft. URL: <<http://www.e-control.at/industrie/strom/strompreis/gewerbepreise>>, verfügbar am 21.04.2016.

Europäische Union: Amtsblatt L 64/1 - Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich Sicherheit in Eisenbahntunneln im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem (TSI-SRT) 2008/163/EG. URL: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008D0163&from=DE>>, verfügbar am 20.04.2016.

IGS - Industrielle Gefahrenmeldesysteme GmbH: Datenblatt Brandmeldecomputer IQ8-Control M Paket 1. URL: <<http://www.igs-hagen.de/produktDatenblaetter/brandmelderzentralen/111-datenblatt-brandmeldecomputer-iq8-control-m-paket-1>>, verfügbar am 21.04.2016.

Gassner, Stefan: Instandhaltungsdienstleistungen in Produktionsnetzwerken: Mehrzielentscheidung zwischen Make, Buy, Concurrent Sourcing und Cooperate - Wiesbaden: Springer Gabler Verlag, 2013.

Geißdörfer, Klaus: Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC): Einsatz und Modelle: Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA - Oestrich-Winkel: 2008. Oestrich-Winkel, European Business School, Dissertation, 2008.

Götze, Uwe: Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben - 6. Auflage - Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008.

Heesen, Bernd: Investitionsrechnung für Praktiker: Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen - 2. Auflage - Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012.

Herrmann, Christoph: Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen - Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2010.

HOB-I 2004: Besonderer Teil der Honorarleitlinie Bauwesen Ingenieurbauwerke, Planung und örtliche Bauaufsicht. URL: <http://www.pmttools.eu/download/seminar/HOB-I_2004.pdf>, verfügbar am 21.04.2016.

ILF Beratende Ingenieure ZT Ges mbH: Notfallkonzepte für österreichische Eisenbahntunnel. URL: <http://www.ilf.com/fileadmin/user_upload/publikationen/49_Notfallkonzepte_oesterreichische_Eisenbahntunnel.pdf>, verfügbar am 20.04.2016.

Männel, Wolfgang: Fachseminar Instandhaltung 2004 - 1. Auflage - Lauf an der Pegnitz: Verlag der Gesellschaft für Angewandte Betriebswirtschaft, 2004.

Matyas, Kurt: Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern - 5. Auflage - München, Wien: Hanser Verlag, 2013.

Nemeti, Andrea; Denkena, Berend; Röders, Gerd; Lemanski Olgierd; Kohlmeyer, Peter: Technologieplanung und -bewertung. In: Productivity Management. - Berlin: GITO Verlag. - 19 (2014) 1, Seite 43 - 46.

Ott, Steven: Investitionsrechnung in der öffentlichen Verwaltung: Die praktische Bewertung von Investitionsvorhaben - Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011.

ÖBB-Infrastruktur AG: Broschüre Die Koralmbahn September 2015. URL: <http://www.oebb.at/infrastruktur/___resources/llShowDoc.jsp?nodeId=66026849>, verfügbar am 20.04.2015.

ÖBB-Infrastruktur AG: Geschäftsbericht 2014. URL: <http://www.oebb.at/infrastruktur/de/2_0_Das_Unternehmen/2_7_Publikationen/2_7_1_Geschaeftsbericht/Teaser_Downloads/OEBB_Infra_GB2014.pdf>, verfügbar am 09.09.2015.

ÖBB-Infrastruktur AG: Zielnetz 2025 Ergebnisbericht. URL: <http://www.oebb.at/infrastruktur/___resources/llShowDoc.jsp?nodeId=24317321>, verfügbar am 12.09.2015.

ÖNORM F3070: Planung, Projektierung, Installation, Inbetriebnahme und Instandhaltung von Brandmeldeanlagen und Brandfallsteuerungen - Wien: Austrian Standards Institute, 2010.

ÖNORM EN 13306: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung - Wien: Austrian Standards Institute, 2010.

Pany, Martin: Fehl- und Täuschungsalarme an Brandmeldeanlagen: Welche Möglichkeiten bieten sich zur Kostenreduktion in Brandmeldesystemen ausgelöst durch Fehl- und Täuschungsalarme - Krems: 2010. Krems, Donau-Universität Krems, Zentrum für Praxisorientierte Informatik, Masterthesis, 2010.

Schmalenbach, Eugen: Kostenrechnung und Preispolitik - 8. Auflage - Köln, Opladen: Westdeutscher Verlag, 1963.

Schröder, Werner: Ganzheitliches Instandhaltungsmanagement: Aufbau, Ausgestaltung und Bewertung - Wiesbaden: Gabler Verlag, 2010.

Stelling, Johannes N.: Kostenmanagement und Controlling - 3. Auflage - München: Oldenbourg Verlag, 2009.

Siemens, Brandschutz-Wegweiser: Technischer Brandschutz und Brandschutzsysteme - 2. überarbeitete Auflage - Erlangen: Publicis Publishing, 2013.

ÜBZERT - Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Beratungsstelle für Brand- und Umweltschutz: R-19-Zertifizierung-von-Fachfirmen-für-Brandmeldeanlagen-Version-K-01.04.2015. URL: <<http://uebzert.at/wp-content/uploads/R-19-Zertifizierung-von-Fachfirmen-für-Brandmeldeanlagen-Version-K-01.04.2015.pdf>>, verfügbar am 20.04.2016.

VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC) - Berlin: Beuth Verlag, 2005.

Wagner: Produktinformation Titanus Pro-Sens 2 - Stand 12/2009. URL:
<http://www.wagner.de/uploads/tx_wdownloads/WAGNER_PI_TITANUS_PROSENS.pdf>, verfügbar am 21.04.2016.

Wilhelm, Martin: Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung stochastischer Alterungsprozesse: Ein Beitrag zur systematischen Bewirtschaftung von Immobilien - Karlsruhe: 2011. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Dissertation, 2011.

Zehbold, Cornelia: Lebenszykluskostenrechnung - Wiesbaden: Gabler Verlag, 1996.

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V Fachverband Sicherheit: Merkblatt Verfügbarkeit von Brandmeldeanlagen. URL:<
<http://www.zvei.org/Publikationen/Merkblatt-33009-2012-09-Verfuegbarkeit-von-BMA.pdf>>, verfügbar am 21.04.2016.

Anhang

Anhang 1: Kapitalwertberechnung Variante 1 (mit $i = 3\%$)

Anhang 2: Kapitalwertberechnung Variante 2 (mit $i = 3\%$)

Anhang 3: Kapitalwertberechnung Variante 1 (mit $i = 11,25\%$)

Anhang 4: Kapitalwertberechnung Variante 2 (mit $i = 11,25\%$)

Anhang 5: Endwertberechnung Variante 1 (mit $i = 3\%$)

Anhang 6: Endwertberechnung Variante 2 (mit $i = 3\%$)

Anhang 1: Kapitalwertberechnung Variante 1 (mit $i = 3\%$)

Periode	Periodenfehlbetrag	Abzinsungsfaktor (mit $i = 3\%$)	Barwert
0	- 528.982,46		
1	- 62.873,69	0,970873786	- 61.042,42
2	- 62.873,69	0,942595909	- 59.264,48
3	- 62.873,69	0,915141659	- 57.538,33
4	- 62.873,69	0,888487048	- 55.862,46
5	- 62.873,69	0,862608784	- 54.235,40
6	- 62.873,69	0,837484257	- 52.655,73
7	- 62.873,69	0,813091511	- 51.122,06
8	- 62.873,69	0,789409234	- 49.633,07
9	- 62.873,69	0,766416732	- 48.187,45
10	- 62.873,69	0,744093915	- 46.783,93
11	- 62.873,69	0,722421277	- 45.421,29
12	- 62.873,69	0,70137988	- 44.098,34
13	- 62.873,69	0,68095134	- 42.813,92
14	- 62.873,69	0,661117806	- 41.566,92
15	- 62.873,69	0,641861947	- 40.356,23
16	- 62.873,69	0,623166939	- 39.180,80
17	- 62.873,69	0,605016446	- 38.039,62
18	- 62.873,69	0,587394608	- 36.931,67
19	- 62.873,69	0,570286027	- 35.855,99
20	- 491.602,11	0,553675754	- 272.188,17
21	- 62.873,69	0,537549276	- 33.797,71
22	- 62.873,69	0,521892501	- 32.813,31
23	- 62.873,69	0,506691748	- 31.857,58
24	- 62.873,69	0,491933736	- 30.929,69
25	- 62.873,69	0,477605569	- 30.028,82
26	- 62.873,69	0,463694727	- 29.154,20
27	- 62.873,69	0,450189056	- 28.305,05
28	- 62.873,69	0,437076753	- 27.480,63
29	- 62.873,69	0,424346362	- 26.680,22
30	- 62.873,69	0,41198676	- 25.903,13
31	- 62.873,69	0,399987145	- 25.148,67
32	- 62.873,69	0,388337034	- 24.416,18
33	- 62.873,69	0,377026247	- 23.705,03
34	- 62.873,69	0,3660449	- 23.014,59
35	- 62.873,69	0,355383398	- 22.344,27
36	- 62.873,69	0,345032425	- 21.693,46
37	- 62.873,69	0,334982937	- 21.061,61
38	- 62.873,69	0,325226152	- 20.448,17
39	- 62.873,69	0,315753546	- 19.852,59
40	- 528.982,46	0,306556841	- 162.163,19
41	- 62.873,69	0,297628001	- 18.712,97
42	- 62.873,69	0,288959224	- 18.167,93
43	- 62.873,69	0,280542936	- 17.638,77

44	-	62.873,69	0,272371782	-	17.125,02
45	-	62.873,69	0,264438624	-	16.626,23
46	-	62.873,69	0,256736528	-	16.141,97
47	-	62.873,69	0,249258765	-	15.671,82
48	-	62.873,69	0,241998801	-	15.215,36
49	-	62.873,69	0,234950292	-	14.772,19
50	-	62.873,69	0,22810708	-	14.341,93
51	-	62.873,69	0,221463184	-	13.924,21
52	-	62.873,69	0,2150128	-	13.518,65
53	-	62.873,69	0,208750292	-	13.124,90
54	-	62.873,69	0,202670186	-	12.742,62
55	-	62.873,69	0,196767171	-	12.371,48
56	-	62.873,69	0,191036088	-	12.011,14
57	-	62.873,69	0,18547193	-	11.661,30
58	-	62.873,69	0,180069835	-	11.321,65
59	-	62.873,69	0,174825083	-	10.991,90
60	-	528.982,46	0,16973309	-	89.785,83
61	-	62.873,69	0,164789408	-	10.360,92
62	-	62.873,69	0,159989716	-	10.059,14
63	-	62.873,69	0,155329822	-	9.766,16
64	-	62.873,69	0,150805652	-	9.481,71
65	-	62.873,69	0,146413254	-	9.205,54
66	-	62.873,69	0,142148791	-	8.937,42
67	-	62.873,69	0,138008535	-	8.677,11
68	-	62.873,69	0,133988869	-	8.424,37
69	-	62.873,69	0,13008628	-	8.179,00
70	-	62.873,69	0,126297359	-	7.940,78
			Anschaffungsauszahlung	-	528.982,46
			Kapitalwert	-	-2.819.458,87

Anhang 2: Kapitalwertberechnung Variante 2 (mit $i = 3\%$)

Periode	Periodenfehlbetrag	Abzinsungsfaktor (mit $i = 3\%$)	Barwert
0	- 669.417,23	-	
1	- 44.787,04	0,970873786	- 43.482,56
2	- 44.787,04	0,942595909	- 42.216,08
3	- 44.787,04	0,915141659	- 40.986,49
4	- 44.787,04	0,888487048	- 39.792,70
5	- 44.787,04	0,862608784	- 38.633,69
6	- 44.787,04	0,837484257	- 37.508,44
7	- 44.787,04	0,813091511	- 36.415,96
8	- 44.787,04	0,789409234	- 35.355,30
9	- 44.787,04	0,766416732	- 34.325,54
10	- 44.787,04	0,744093915	- 33.325,76
11	- 44.787,04	0,722421277	- 32.355,11
12	- 44.787,04	0,70137988	- 31.412,73
13	- 44.787,04	0,68095134	- 30.497,79
14	- 44.787,04	0,661117806	- 29.609,51
15	- 44.787,04	0,641861947	- 28.747,10
16	- 44.787,04	0,623166939	- 27.909,80
17	- 44.787,04	0,605016446	- 27.096,90
18	- 44.787,04	0,587394608	- 26.307,67
19	- 44.787,04	0,570286027	- 25.541,42
20	- 643.411,97	0,553675754	- 356.241,61
21	- 44.787,04	0,537549276	- 24.075,24
22	- 44.787,04	0,521892501	- 23.374,02
23	- 44.787,04	0,506691748	- 22.693,22
24	- 44.787,04	0,491933736	- 22.032,26
25	- 44.787,04	0,477605569	- 21.390,54
26	- 44.787,04	0,463694727	- 20.767,51
27	- 44.787,04	0,450189056	- 20.162,64
28	- 44.787,04	0,437076753	- 19.575,37
29	- 44.787,04	0,424346362	- 19.005,22
30	- 44.787,04	0,41198676	- 18.451,67
31	- 44.787,04	0,399987145	- 17.914,24
32	- 44.787,04	0,388337034	- 17.392,47
33	- 44.787,04	0,377026247	- 16.885,89
34	- 44.787,04	0,3660449	- 16.394,07
35	- 44.787,04	0,355383398	- 15.916,57
36	- 44.787,04	0,345032425	- 15.452,98
37	- 44.787,04	0,334982937	- 15.002,89
38	- 44.787,04	0,325226152	- 14.565,92
39	- 44.787,04	0,315753546	- 14.141,67
40	- 669.417,23	0,306556841	- 205.214,43

41	-	44.787,04	0,297628001	-	13.329,88
42	-	44.787,04	0,288959224	-	12.941,63
43	-	44.787,04	0,280542936	-	12.564,69
44	-	44.787,04	0,272371782	-	12.198,73
45	-	44.787,04	0,264438624	-	11.843,42
46	-	44.787,04	0,256736528	-	11.498,47
47	-	44.787,04	0,249258765	-	11.163,56
48	-	44.787,04	0,241998801	-	10.838,41
49	-	44.787,04	0,234950292	-	10.522,73
50	-	44.787,04	0,22810708	-	10.216,24
51	-	44.787,04	0,221463184	-	9.918,68
52	-	44.787,04	0,2150128	-	9.629,79
53	-	44.787,04	0,208750292	-	9.349,31
54	-	44.787,04	0,202670186	-	9.077,00
55	-	44.787,04	0,196767171	-	8.812,62
56	-	44.787,04	0,191036088	-	8.555,94
57	-	44.787,04	0,18547193	-	8.306,74
58	-	44.787,04	0,180069835	-	8.064,79
59	-	44.787,04	0,174825083	-	7.829,90
60	-	669.417,23	0,16973309	-	113.622,25
61	-	44.787,04	0,164789408	-	7.380,43
62	-	44.787,04	0,159989716	-	7.165,47
63	-	44.787,04	0,155329822	-	6.956,76
64	-	44.787,04	0,150805652	-	6.754,14
65	-	44.787,04	0,146413254	-	6.557,42
66	-	44.787,04	0,142148791	-	6.366,42
67	-	44.787,04	0,138008535	-	6.180,99
68	-	44.787,04	0,133988869	-	6.000,96
69	-	44.787,04	0,13008628	-	5.826,18
70	-	44.787,04	0,126297359	-	5.656,48
			Anschaffungsauszahlung	-	669.417,23
			Kapitalwert		-2.602.718,25

Anhang 3: Kapitalwertberechnung Variante 1 (mit $i = 11,25\%$)

Periode	Periodenfehlbetrag	Abzinsungsfaktor (mit $i = 11,25\%$)	Barwert
0	- 528.982,46		
1	- 62.873,69	0,898876404	- 56.515,68
2	- 62.873,69	0,807978791	- 50.800,61
3	- 62.873,69	0,72627307	- 45.663,47
4	- 62.873,69	0,652829726	- 41.045,81
5	- 62.873,69	0,586813237	- 36.895,11
6	- 62.873,69	0,527472572	- 33.164,15
7	- 62.873,69	0,474132649	- 29.810,47
8	- 62.873,69	0,426186651	- 26.795,93
9	- 62.873,69	0,383089125	- 24.086,23
10	- 62.873,69	0,344349775	- 21.650,54
11	- 62.873,69	0,309527888	- 19.461,16
12	- 62.873,69	0,278227315	- 17.493,18
13	- 62.873,69	0,250091968	- 15.724,20
14	- 62.873,69	0,224801769	- 14.134,12
15	- 62.873,69	0,202069006	- 12.704,82
16	- 62.873,69	0,181635062	- 11.420,07
17	- 62.873,69	0,163267471	- 10.265,23
18	- 62.873,69	0,146757277	- 9.227,17
19	- 62.873,69	0,131916654	- 8.294,09
20	- 491.602,11	0,118576767	- 58.292,59
21	- 62.873,69	0,106585858	- 6.701,45
22	- 62.873,69	0,095807513	- 6.023,77
23	- 62.873,69	0,086119113	- 5.414,63
24	- 62.873,69	0,077410439	- 4.867,08
25	- 62.873,69	0,069582417	- 4.374,90
26	- 62.873,69	0,062545993	- 3.932,50
27	- 62.873,69	0,056221117	- 3.534,83
28	- 62.873,69	0,050535835	- 3.177,37
29	- 62.873,69	0,04542547	- 2.856,07
30	- 62.873,69	0,040831883	- 2.567,25
31	- 62.873,69	0,036702816	- 2.307,64
32	- 62.873,69	0,032991296	- 2.074,28
33	- 62.873,69	0,029655097	- 1.864,53
34	- 62.873,69	0,026656267	- 1.675,98
35	- 62.873,69	0,02396069	- 1.506,50
36	- 62.873,69	0,021537698	- 1.354,15
37	- 62.873,69	0,019359729	- 1.217,22
38	- 62.873,69	0,017402004	- 1.094,13
39	- 62.873,69	0,01564225	- 983,49
40	- 528.982,46	0,01406045	- 7.437,73

41	-	62.873,69	0,012638607	-	794,64
42	-	62.873,69	0,011360545	-	714,28
43	-	62.873,69	0,010211726	-	642,05
44	-	62.873,69	0,00917908	-	577,12
45	-	62.873,69	0,008250858	-	518,76
46	-	62.873,69	0,007416502	-	466,30
47	-	62.873,69	0,006666518	-	419,15
48	-	62.873,69	0,005992376	-	376,76
49	-	62.873,69	0,005386405	-	338,66
50	-	62.873,69	0,004841713	-	304,42
51	-	62.873,69	0,004352101	-	273,63
52	-	62.873,69	0,003912001	-	245,96
53	-	62.873,69	0,003516406	-	221,09
54	-	62.873,69	0,003160814	-	198,73
55	-	62.873,69	0,002841181	-	178,64
56	-	62.873,69	0,002553871	-	160,57
57	-	62.873,69	0,002295614	-	144,33
58	-	62.873,69	0,002063473	-	129,74
59	-	62.873,69	0,001854807	-	116,62
60	-	528.982,46	0,001667243	-	881,94
61	-	62.873,69	0,001498645	-	94,23
62	-	62.873,69	0,001347097	-	84,70
63	-	62.873,69	0,001210873	-	76,13
64	-	62.873,69	0,001088426	-	68,43
65	-	62.873,69	0,00097836	-	61,51
66	-	62.873,69	0,000879425	-	55,29
67	-	62.873,69	0,000790494	-	49,70
68	-	62.873,69	0,000710557	-	44,68
69	-	62.873,69	0,000638703	-	40,16
70	-	62.873,69	0,000574115	-	36,10
		Anschaffungsauszahlung		-	528.982,46
		Kapitalwert			-1.145.706,89

Anhang 4: Kapitalwertberechnung Variante 2 (mit $i = 11,25\%$)

Periode	Periodenfehlbetrag	Abzinsungsfaktor (mit $i = 11,25\%$)	Barwert
0	- 669.417,23	-	
1	- 44.787,04	0,898876404	- 40.258,01
2	- 44.787,04	0,807978791	- 36.186,98
3	- 44.787,04	0,72627307	- 32.527,62
4	- 44.787,04	0,652829726	- 29.238,31
5	- 44.787,04	0,586813237	- 26.281,63
6	- 44.787,04	0,527472572	- 23.623,94
7	- 44.787,04	0,474132649	- 21.235,00
8	- 44.787,04	0,426186651	- 19.087,64
9	- 44.787,04	0,383089125	- 17.157,43
10	- 44.787,04	0,344349775	- 15.422,41
11	- 44.787,04	0,309527888	- 13.862,84
12	- 44.787,04	0,278227315	- 12.460,98
13	- 44.787,04	0,250091968	- 11.200,88
14	- 44.787,04	0,224801769	- 10.068,21
15	- 44.787,04	0,202069006	- 9.050,07
16	- 44.787,04	0,181635062	- 8.134,90
17	- 44.787,04	0,163267471	- 7.312,27
18	- 44.787,04	0,146757277	- 6.572,82
19	- 44.787,04	0,131916654	- 5.908,16
20	- 643.411,97	0,118576767	- 76.293,71
21	- 44.787,04	0,106585858	- 4.773,67
22	- 44.787,04	0,095807513	- 4.290,93
23	- 44.787,04	0,086119113	- 3.857,02
24	- 44.787,04	0,077410439	- 3.466,98
25	- 44.787,04	0,069582417	- 3.116,39
26	- 44.787,04	0,062545993	- 2.801,25
27	- 44.787,04	0,056221117	- 2.517,98
28	- 44.787,04	0,050535835	- 2.263,35
29	- 44.787,04	0,04542547	- 2.034,47
30	- 44.787,04	0,040831883	- 1.828,74
31	- 44.787,04	0,036702816	- 1.643,81
32	- 44.787,04	0,032991296	- 1.477,58
33	- 44.787,04	0,029655097	- 1.328,16
34	- 44.787,04	0,026656267	- 1.193,86
35	- 44.787,04	0,02396069	- 1.073,13
36	- 44.787,04	0,021537698	- 964,61
37	- 44.787,04	0,019359729	- 867,06
38	- 44.787,04	0,017402004	- 779,38
39	- 44.787,04	0,01564225	- 700,57
40	- 669.417,23	0,01406045	- 9.412,31

41	-	44.787,04	0,012638607	-	566,05
42	-	44.787,04	0,011360545	-	508,81
43	-	44.787,04	0,010211726	-	457,35
44	-	44.787,04	0,00917908	-	411,10
45	-	44.787,04	0,008250858	-	369,53
46	-	44.787,04	0,007416502	-	332,16
47	-	44.787,04	0,006666518	-	298,57
48	-	44.787,04	0,005992376	-	268,38
49	-	44.787,04	0,005386405	-	241,24
50	-	44.787,04	0,004841713	-	216,85
51	-	44.787,04	0,004352101	-	194,92
52	-	44.787,04	0,003912001	-	175,21
53	-	44.787,04	0,003516406	-	157,49
54	-	44.787,04	0,003160814	-	141,56
55	-	44.787,04	0,002841181	-	127,25
56	-	44.787,04	0,002553871	-	114,38
57	-	44.787,04	0,002295614	-	102,81
58	-	44.787,04	0,002063473	-	92,42
59	-	44.787,04	0,001854807	-	83,07
60	-	669.417,23	0,001667243	-	1.116,08
61	-	44.787,04	0,001498645	-	67,12
62	-	44.787,04	0,001347097	-	60,33
63	-	44.787,04	0,001210873	-	54,23
64	-	44.787,04	0,001088426	-	48,75
65	-	44.787,04	0,00097836	-	43,82
66	-	44.787,04	0,000879425	-	39,39
67	-	44.787,04	0,000790494	-	35,40
68	-	44.787,04	0,000710557	-	31,82
69	-	44.787,04	0,000638703	-	28,61
70	-	44.787,04	0,000574115	-	25,71
		Anschaffungsauszahlung		-	669.417,23
		Kapitalwert			-1.148.102,69

Anhang 5: Endwertberechnung Variante 1 (mit $i = 3\%$)

Periode	Kosten	Aufzinsungsfaktor (mit $i = 3\%$)	Endwert
0	528.982,46		528.982,46
1	62.873,69	1,03	64.759,90
2	62.873,69	1,0609	66.702,70
3	62.873,69	1,092727	68.703,78
4	62.873,69	1,12550881	70.764,89
5	62.873,69	1,159274074	72.887,84
6	62.873,69	1,194052297	75.074,47
7	62.873,69	1,229873865	77.326,71
8	62.873,69	1,266770081	79.646,51
9	62.873,69	1,304773184	82.035,90
10	62.873,69	1,343916379	84.496,98
11	62.873,69	1,384233871	87.031,89
12	62.873,69	1,425760887	89.642,85
13	62.873,69	1,468533713	92.332,13
14	62.873,69	1,512589725	95.102,10
15	62.873,69	1,557967417	97.955,16
16	62.873,69	1,604706439	100.893,82
17	62.873,69	1,652847632	103.920,63
18	62.873,69	1,702433061	107.038,25
19	62.873,69	1,753506053	110.249,40
20	491.602,11	1,806111235	887.888,09
21	62.873,69	1,860294572	116.963,58
22	62.873,69	1,916103409	120.472,49
23	62.873,69	1,973586511	124.086,67
24	62.873,69	2,032794106	127.809,27
25	62.873,69	2,09377793	131.643,54
26	62.873,69	2,156591268	135.592,85
27	62.873,69	2,221289006	139.660,64
28	62.873,69	2,287927676	143.850,46
29	62.873,69	2,356565506	148.165,97
30	62.873,69	2,427262471	152.610,95
31	62.873,69	2,500080345	157.189,28
32	62.873,69	2,575082756	161.904,95
33	62.873,69	2,652335238	166.762,10
34	62.873,69	2,731905296	171.764,97
35	62.873,69	2,813862454	176.917,92
36	62.873,69	2,898278328	182.225,45
37	62.873,69	2,985226678	187.692,22
38	62.873,69	3,074783478	193.322,98
39	62.873,69	3,167026983	199.122,67
40	528.982,46	3,262037792	1.725.560,78

41	62.873,69	3,359898926	211.249,24
42	62.873,69	3,460695894	217.586,72
43	62.873,69	3,56451677	224.114,32
44	62.873,69	3,671452273	230.837,75
45	62.873,69	3,781595842	237.762,88
46	62.873,69	3,895043717	244.895,77
47	62.873,69	4,011895028	252.242,64
48	62.873,69	4,132251879	259.809,92
49	62.873,69	4,256219436	267.604,22
50	62.873,69	4,383906019	275.632,35
51	62.873,69	4,515423199	283.901,32
52	62.873,69	4,650885895	292.418,36
53	62.873,69	4,790412472	301.190,91
54	62.873,69	4,934124846	310.226,64
55	62.873,69	5,082148592	319.533,44
56	62.873,69	5,234613049	329.119,44
57	62.873,69	5,391651441	338.993,02
58	62.873,69	5,553400984	349.162,81
59	62.873,69	5,720003014	359.637,70
60	528.982,46	5,891603104	3.116.554,70
61	62.873,69	6,068351197	381.539,63
62	62.873,69	6,250401733	392.985,82
63	62.873,69	6,437913785	404.775,40
64	62.873,69	6,631051199	416.918,66
65	62.873,69	6,829982735	429.426,22
66	62.873,69	7,034882217	442.309,00
67	62.873,69	7,245928683	455.578,27
68	62.873,69	7,463306544	469.245,62
69	62.873,69	7,68720574	483.322,99
70	62.873,69	7,917821912	497.822,68
		Gesamtsumme Endwerte	19.974.172,18

Anhang 6: Endwertberechnung Variante 2 (mit $i = 3\%$)

Periode	Kosten	Aufzinsungsfaktor (mit $i = 3\%$)	Endwert
0	669.417,23		669.417,23
1	44.787,04	1,03	46.130,65
2	44.787,04	1,0609	47.514,57
3	44.787,04	1,092727	48.940,01
4	44.787,04	1,12550881	50.408,21
5	44.787,04	1,159274074	51.920,45
6	44.787,04	1,194052297	53.478,07
7	44.787,04	1,229873865	55.082,41
8	44.787,04	1,266770081	56.734,88
9	44.787,04	1,304773184	58.436,93
10	44.787,04	1,343916379	60.190,04
11	44.787,04	1,384233871	61.995,74
12	44.787,04	1,425760887	63.855,61
13	44.787,04	1,468533713	65.771,28
14	44.787,04	1,512589725	67.744,42
15	44.787,04	1,557967417	69.776,75
16	44.787,04	1,604706439	71.870,05
17	44.787,04	1,652847632	74.026,15
18	44.787,04	1,702433061	76.246,94
19	44.787,04	1,753506053	78.534,35
20	643.411,97	1,806111235	1.162.073,59
21	44.787,04	1,860294572	83.317,09
22	44.787,04	1,916103409	85.816,60
23	44.787,04	1,973586511	88.391,10
24	44.787,04	2,032794106	91.042,83
25	44.787,04	2,09377793	93.774,12
26	44.787,04	2,156591268	96.587,34
27	44.787,04	2,221289006	99.484,96
28	44.787,04	2,287927676	102.469,51
29	44.787,04	2,356565506	105.543,59
30	44.787,04	2,427262471	108.709,90
31	44.787,04	2,500080345	111.971,20
32	44.787,04	2,575082756	115.330,33
33	44.787,04	2,652335238	118.790,24
34	44.787,04	2,731905296	122.353,95
35	44.787,04	2,813862454	126.024,57
36	44.787,04	2,898278328	129.805,31
37	44.787,04	2,985226678	133.699,47
38	44.787,04	3,074783478	137.710,45
39	44.787,04	3,167026983	141.841,76
40	669.417,23	3,262037792	2.183.664,30

41	44.787,04	3,359898926	150.479,93
42	44.787,04	3,460695894	154.994,33
43	44.787,04	3,56451677	159.644,16
44	44.787,04	3,671452273	164.433,48
45	44.787,04	3,781595842	169.366,48
46	44.787,04	3,895043717	174.447,48
47	44.787,04	4,011895028	179.680,90
48	44.787,04	4,132251879	185.071,33
49	44.787,04	4,256219436	190.623,47
50	44.787,04	4,383906019	196.342,17
51	44.787,04	4,515423199	202.232,44
52	44.787,04	4,650885895	208.299,41
53	44.787,04	4,790412472	214.548,40
54	44.787,04	4,934124846	220.984,85
55	44.787,04	5,082148592	227.614,39
56	44.787,04	5,234613049	234.442,82
57	44.787,04	5,391651441	241.476,11
58	44.787,04	5,553400984	248.720,39
59	44.787,04	5,720003014	256.182,00
60	669.417,23	5,891603104	3.943.940,63
61	44.787,04	6,068351197	271.783,49
62	44.787,04	6,250401733	279.936,99
63	44.787,04	6,437913785	288.335,10
64	44.787,04	6,631051199	296.985,16
65	44.787,04	6,829982735	305.894,71
66	44.787,04	7,034882217	315.071,55
67	44.787,04	7,245928683	324.523,70
68	44.787,04	7,463306544	334.259,41
69	44.787,04	7,68720574	344.287,19
70	44.787,04	7,917821912	354.615,81
		Gesamtsumme Endwerte	18.105.695,22

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 25.04.2016

Gernot Koppeter